



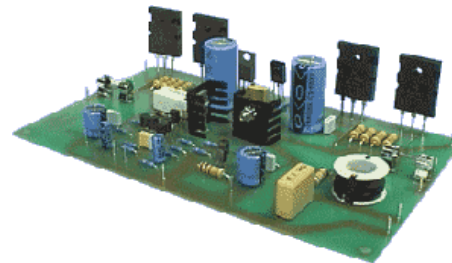
# Tecnología Electrónica

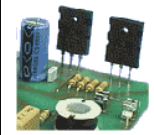
---

---

## Capítulo 5: **Amplificadores Multietapa y Diferenciales.**

---





# Índice



1. Amplificadores multietapa.  
Estructura y tipos de acoplo.
2. Pares de transistores.  
Cascode, Darlington y Diferencial
3. Amplificadores integrados
4. Fuentes de corriente  
Espejos. Fuentes Wilson y Widlar. Fuentes múltiples
5. Amplificadores diferenciales  
Modos y modelos. Análisis en gran y pequeña señal. CMRR.
6. Amplificadores con cargas activas
7. Ejemplos de amplificadores integrados



# 1. Amplificadores multietapa: motivación

- ❑ Configuraciones básicas → características en señal limitadas.
  - Es raro que una sola etapa satisfaga todas las especificaciones necesarias
    - *ganancias, impedancias, márgenes dinámicos, etc.*
- ❑ Los amplificadores prácticos suelen ser **multietapa**
  - Un amplificador *multietapa* está constituido por un conjunto de amplificadores básicos conectados entre sí.
- ❑ Objetivos de un diseño multietapa, muy variados.
  - Obtener una **ganancia global** mayor que con una sola etapa.
  - Obtener unas **impedancias** en **entrada** y **salida**, adecuadas a la aplicación.
  - **Adaptar las características de la señal** a las especificaciones dadas, en tensión, corriente, frecuencia, potencia, etc.
  - **Aprovechar los puntos fuertes** de cada configuración básica y al mismo tiempo compensar o disminuir sus puntos débiles.

# 1.1. Amplificadores multietapa: estructura

## □ Una estructura típica

- Tres etapas: **de entrada**, **intermedia**, y **de salida**.



## □ Criterios de diseño

### ■ Etapa de **entrada**:

- *Adaptarse al generador de señal. Parámetros: impedancia de entrada, niveles de ruido, etc.*

### ■ Etapa **intermedia**:

- *Ganancia adicional. Adaptar niveles entre etapas de entrada y salida.*

### ■ Etapa de **salida**:

- *Adaptarse a la carga. Parámetros: impedancia de salida, niveles de potencia o amplitud final de la señal deseada.*

## 1.2. Acoplo entre etapas

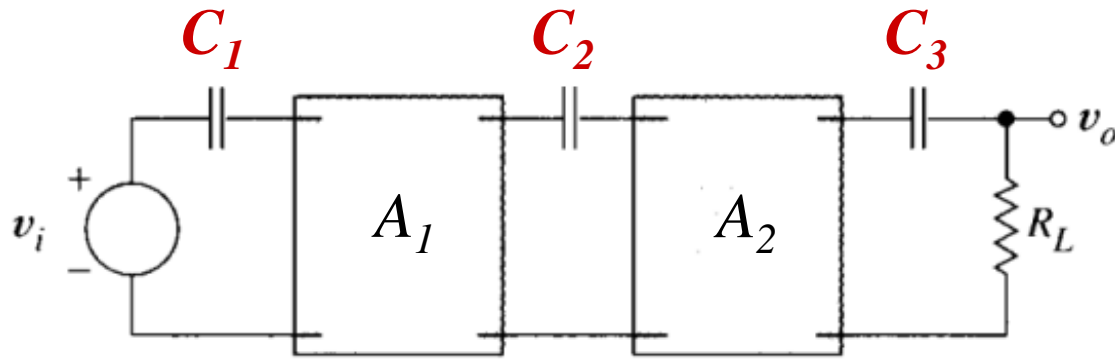
- Un problema a resolver
  - El **acoplo** (forma de conexión... → ) entre etapas:



- Necesidad
  - Transferir la señal a través de todas las etapas.
- Restricciones
  - No interesa modificar los puntos de trabajo ni alterar las características de cada etapa, del generador y de la carga.
  - Debe transferirse la señal en las mejores condiciones posibles, sin alterar la información incluida en ella.
    - *Ausencia de distorsión, componentes de frecuencia de interés, etc.*

## 1.2. Tipos de acoplo. Acoplo capacitivo.

- ❑ Tipos básicos: capacitivo, inductivo y directo
  - El acoplo óptico es posible, aunque no es sencillo de realizar.
- ❑ Acoplo **capacitivo**
  - Utiliza un condensador para aislar en DC (polarización) y dejar pasar señales en cierta banda de frecuencias.

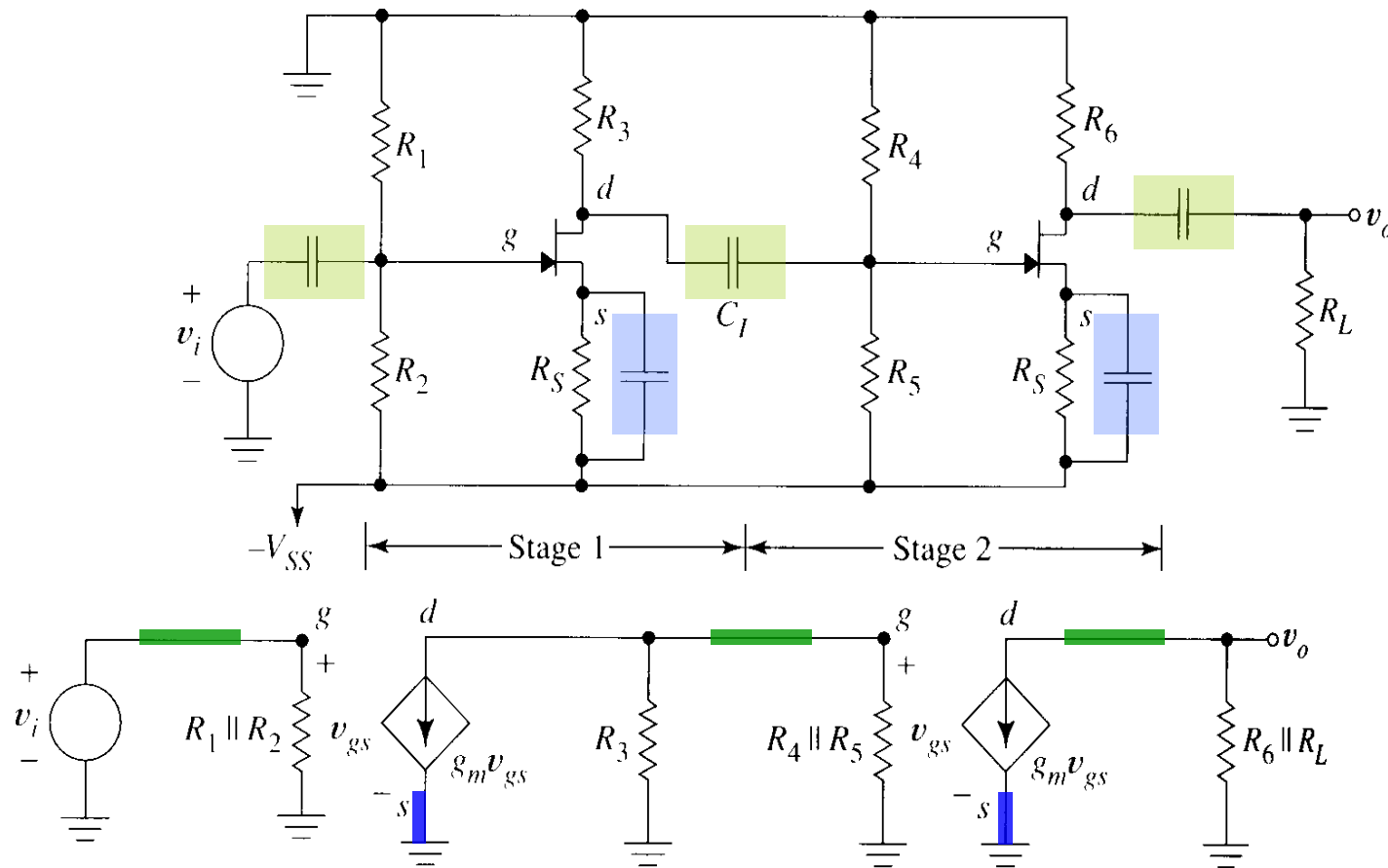


La impedancia de  $C_x$  es tal que resulta un c.c. a las frecuencias útiles de la señal:

$$|Z_{C_x}| = \frac{1}{\omega \cdot C_x} \ll$$

## 1.2. Tipos de acoplo. Nomenclatura

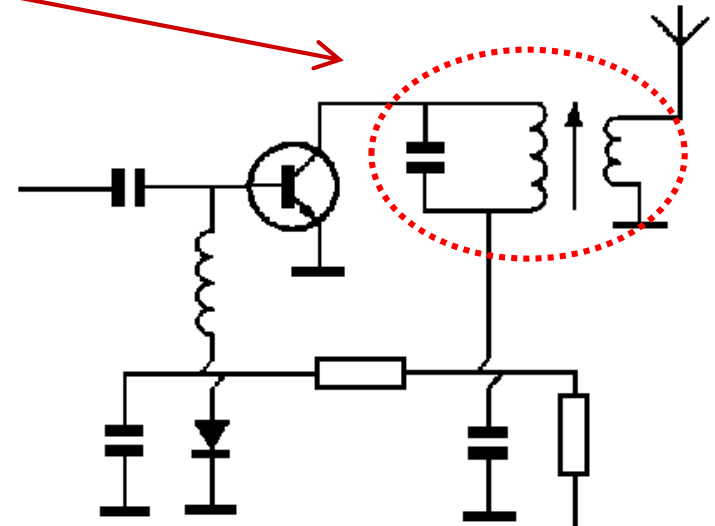
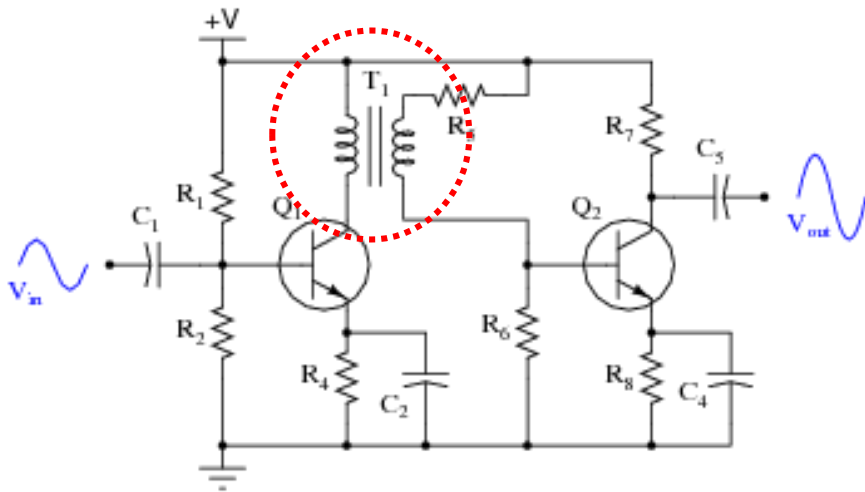
- ❑ Configuran la estructura del circuito en señal. Un ejemplo:
  - **C. de Acoplo:** conecta dos etapas o deja pasar la señal a su través.
  - **C. de Desacoplo:** elimina del cto. en señal un elemento dado.



## 1.2. Tipos de acoplo. Acoplo inductivo.

### ❑ Acoplo **inductivo**

- Emplea transformadores, elementos electromagnéticos, etc.
- En bajas frecuencias (p.e. audio) no interesa mucho, por el elevado peso y volumen de los transformadores necesarios.
- Es conveniente en **altas frecuencias** o si se requiere **aislamiento galvánico** entre elementos o etapas del circuito.
- Puede formar un **filtro resonante** con una LC adecuada.

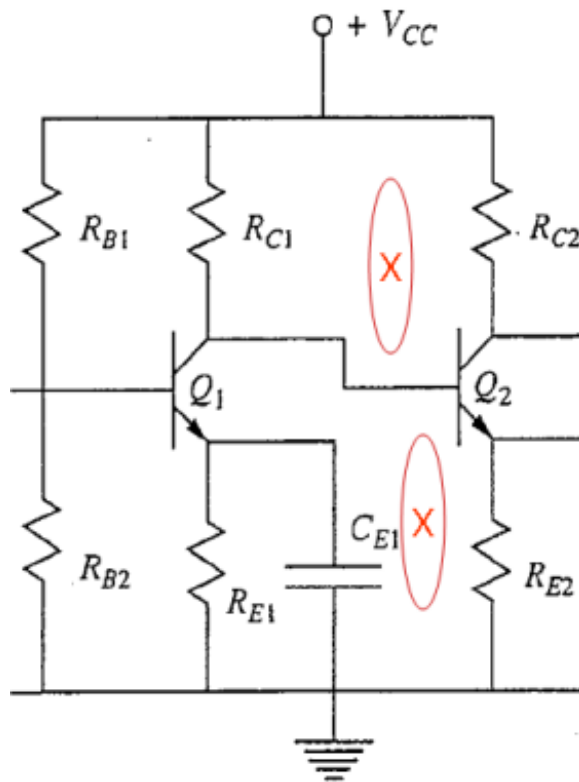




## 1.2. Tipos de acoplo. Acoplo directo.

### ❑ Acoplo **directo**

- La salida de una etapa se une eléctricamente a la entrada de la siguiente etapa.



### ❑ Ventajas:

- Utiliza menos componentes para polarizar los elementos activos.
- Permite amplificar desde frecuencia cero.
- Es esencial en amps. de continua, como el Operacional.

### ❑ Inconvenientes (*relativos...*):

- Los puntos de trabajo de los dispositivos están interrelacionados.
- En consecuencia, deben fijarse de forma conjunta en todos ellos.

## 2. Pares de transistores. Par **Cascodo**

❑ Ciertas combinaciones de **dos** transistores con **acoplo directo** tienen propiedades peculiares. Algunos ejemplos:

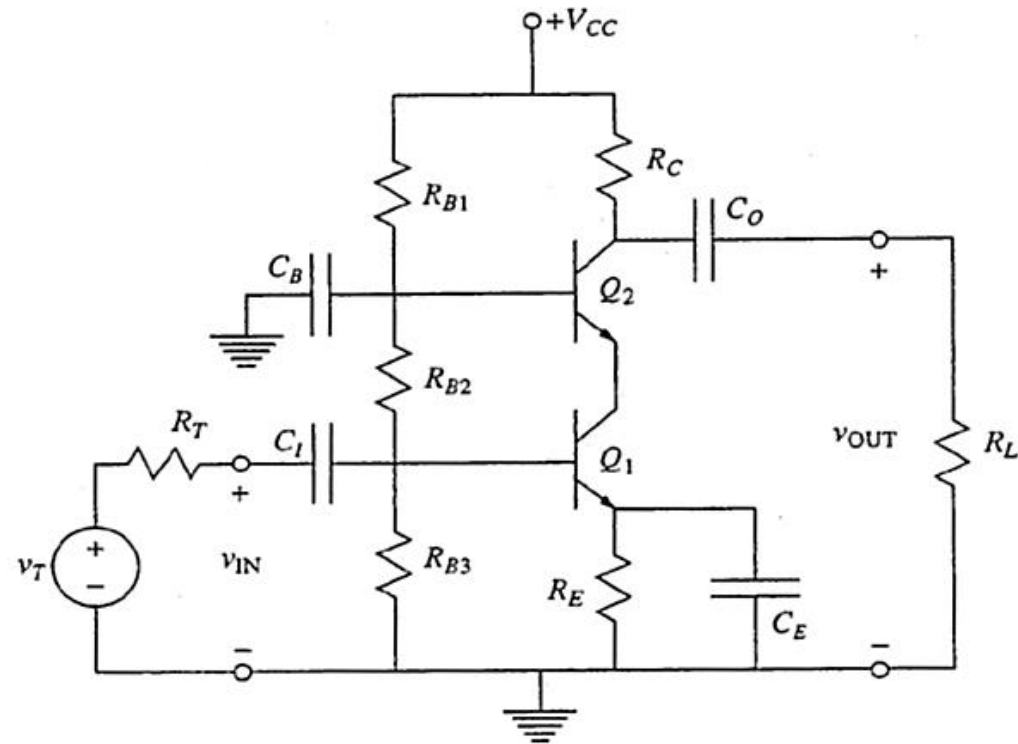
- Par cascodo, par diferencial, *Darlington*, PNP compuesto, etc.

❑ Par **cascodo**. (figura adjunta)

- Combinación en serie para señal variable (*cascada*), de un emisor común (Q1) y un base común (Q2) → (EC-BC)

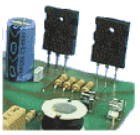
- Configuración útil en Alta Frecuencia

- En frecuencias medias se comporta como una etapa E.C. simple



➔ Actividad:

- ¿Por qué esta etapa se llama *cascodo*? Suba esta información al Foro de la asignatura.



## 2. Par **Darlington**

- El Par Darlington equivale a **un único transistor** compuesto
  - El Darlington básico tiene tres terminales exteriores: E, B y C
    - *Es como un BJT con el doble de  $V_{BE}$  en conducción y una beta muy alta*

$$V_{BE\_Darlington} = V_{BED} = 2V_{BE}$$

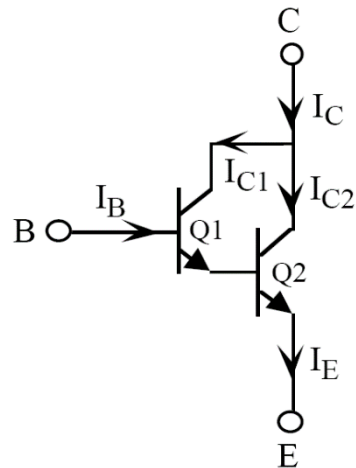
$$I_{CD} = I_{C1} + I_{C2} = \beta_1 I_{B1} + \beta_2 I_{B2}$$

$$I_{BD} = I_{B1}$$

$$I_{B2} = I_{E1} = (1 + \beta_1) I_{B1} \approx \beta_1 I_{B1}$$

$$\beta_D = \frac{I_{CD}}{I_{BD}} \approx \beta_1 + \beta_1 \beta_2$$

$$\beta_D \approx \beta_1 \beta_2$$



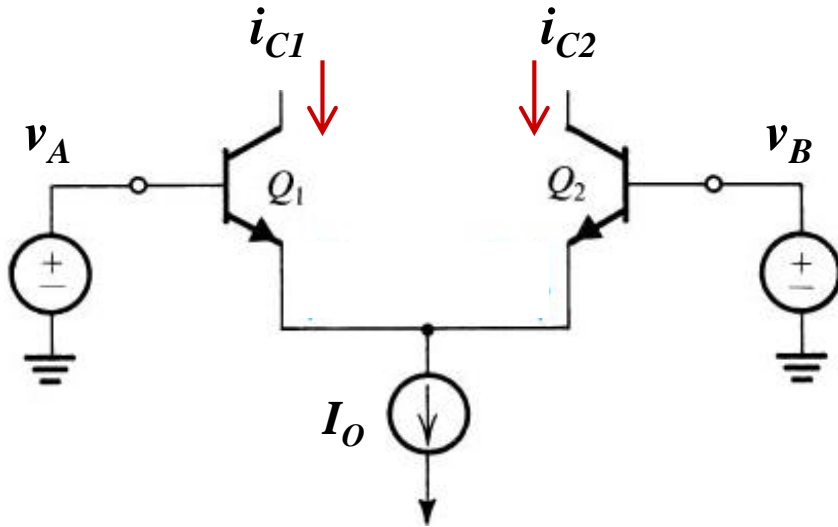
- Hay versiones con un cuarto terminal: entre E1 y B2.
  - *En este caso, se analiza mejor como DOS BJT en serie.*

- El Darlington se usa mucho como **switch** (interruptor)
  - Control simple de cargas (motor, luces...) desde un Sistema Digital

➔ Actividad:

- busque en Internet "*Darlington Array*" y aplicaciones.

## 2. Par diferencial.

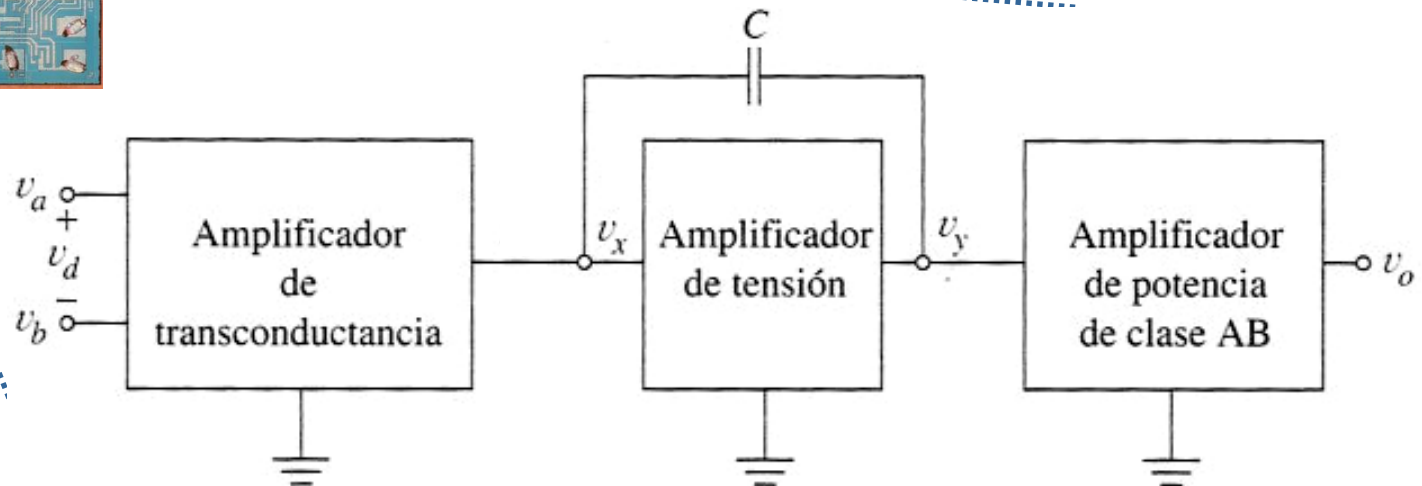
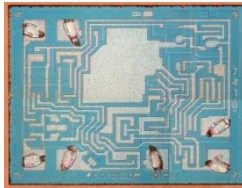


- Conjunto de dos transistores:
  - Unidos por los terminales de referencia de ambos Q's
    - **BJT**: emisores unidos  
→ Par acoplado por **emisor**.
    - **FET**: fuentes unidas  
→ Par acoplado por **fuentes**.
- **Polarización** por corriente en el punto común: generador  $I_O$
- Estructura **simétrica**, referida al punto común.
- **Dos entradas**: una en cada transistor (base o puerta).
- **Dos salidas**: las corrientes de cada transistor (colector o drenador).
- El par diferencial es una configuración **esencial** en amplificación.
  - **Bloque básico** de muchos **amplificadores integrados** (→ **OP's**)
  - Dedicaremos una sección completa a su estudio.

# 3. Amplificadores integrados. Introducción.

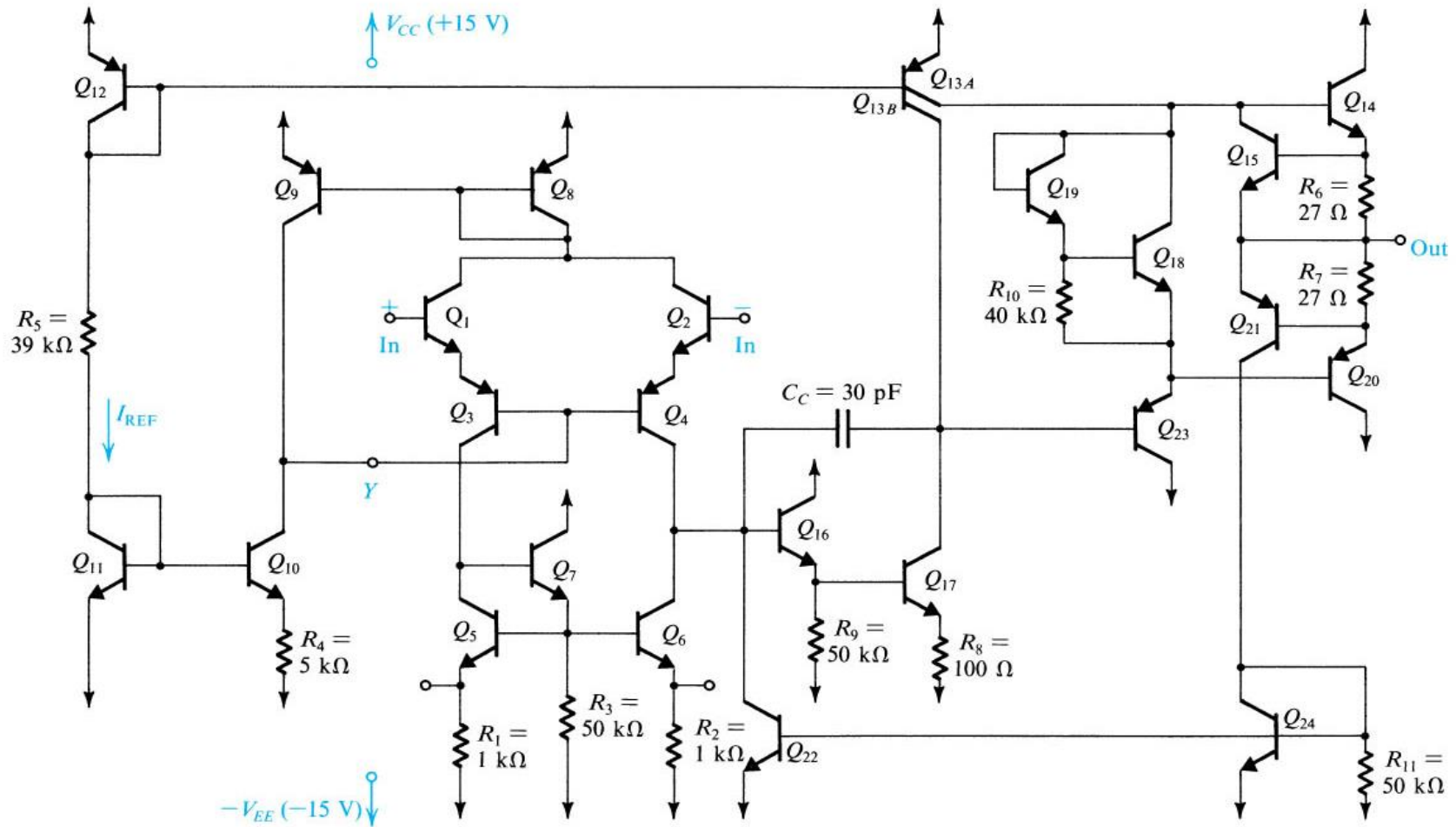
## Amplificadores integrados

- En un solo IC, incluyen todo lo necesario:
  - *Polarización, etapas de amplificación, circuitos de protección, etc.*
- Un ejemplo típico: el AO tipo **741** → organizado en tres etapas
  - *Acoplo directo entre ellas, luego es un **amplificador de continua**.*
  - **Nota:** la función de C (capacidad Miller) se verá oportunamente.



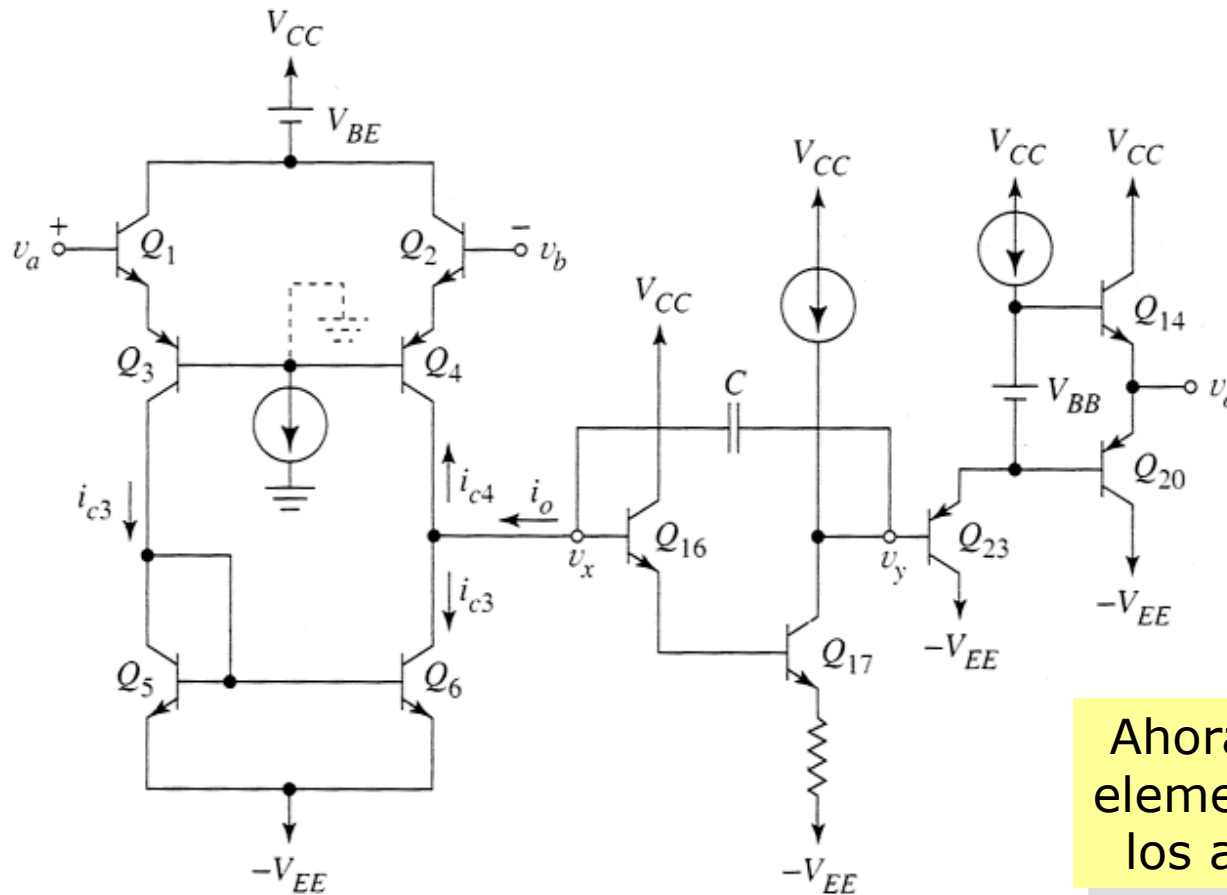
### 3. Ejemplo: estructura del AO 741 (detalle)

- El circuito interno del 741 es aparentemente muy complejo...



### 3. Ejemplo: estructura del AO 741 (bloques)

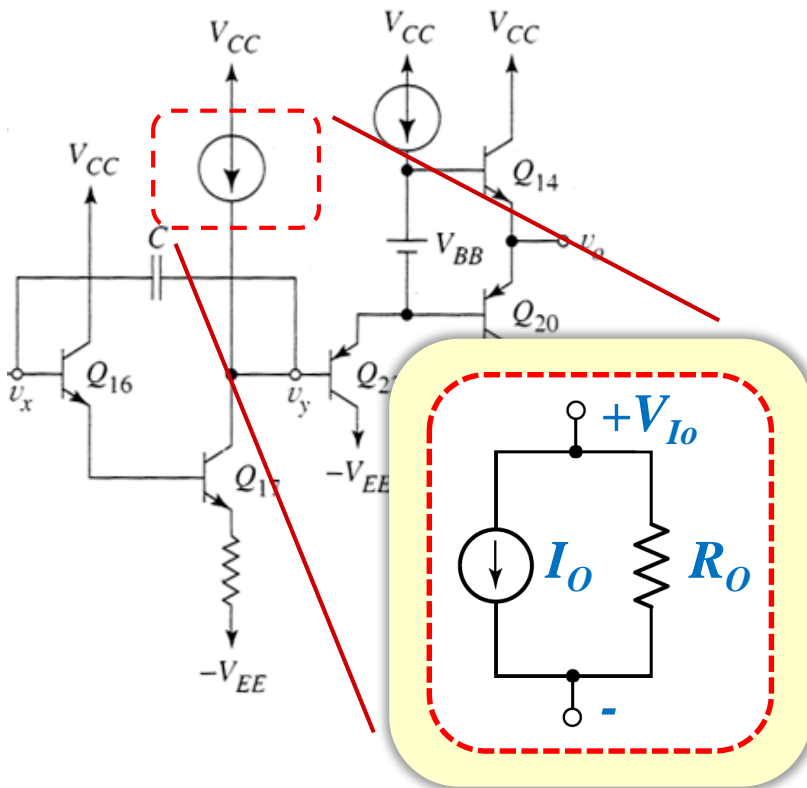
- ❑ Puede dividirse en **bloques funcionales** muy claros:
  - Redes de polarización, mediante **fuentes de corriente**.
  - Etapas de amplificación estándar: **diferencial**, EC, **potencia**.



Ahora estudiaremos los elementos principales de los amplif. integrados.

## 4. Fuentes de corriente

- ❑ La polarización por fuentes de corriente es frecuente en los CI's
  - Facilitan puntos de trabajo  $Q$  muy estables
  - En CI's, los TRT's ocupan menos superficie de chip que los resistores  $\rightarrow$  mayor densidad de integración.



- ❑ ¿Qué les pedimos a las fuentes de corriente de polarización?

- Corriente constante:  $R_O \rightarrow \infty$
- Tensión de trabajo,  $V_{I_O}$ , maximizada
- Independientes de otros parámetros como: alimentación, temperatura...
- Ocupar la menor superficie de chip posible (resistores no muy grandes)

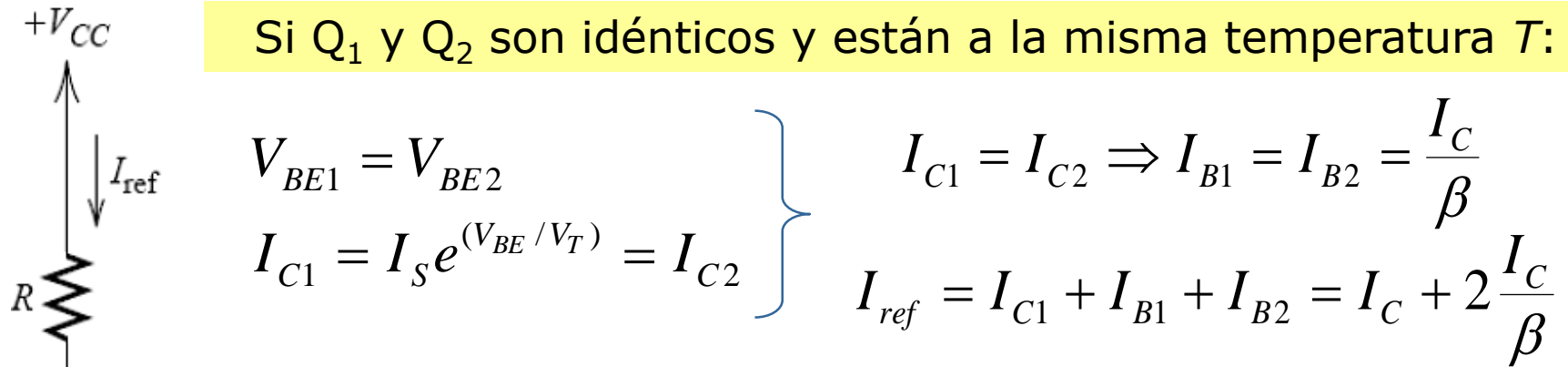
*Las diversas configuraciones de fuentes tratan de responder a estas condiciones de trabajo*



## 4.1. Espejo de corriente: circuito básico.

- El efecto 'espejo de corriente' se da cuando dos TRTs comparten variable de control, haciendo uno de ellos de referencia.
  - En el "espejo de corriente" con BJT, comparten la misma  $V_{BE}$ .

Si  $Q_1$  y  $Q_2$  son idénticos y están a la misma temperatura  $T$ :



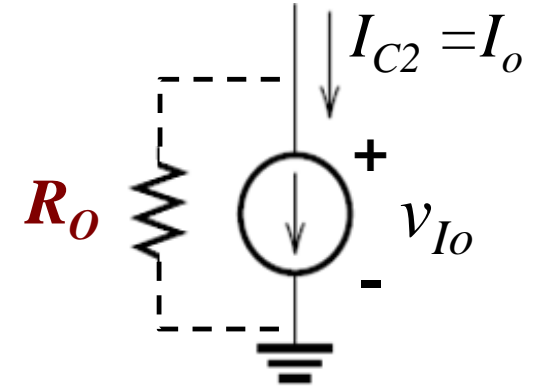
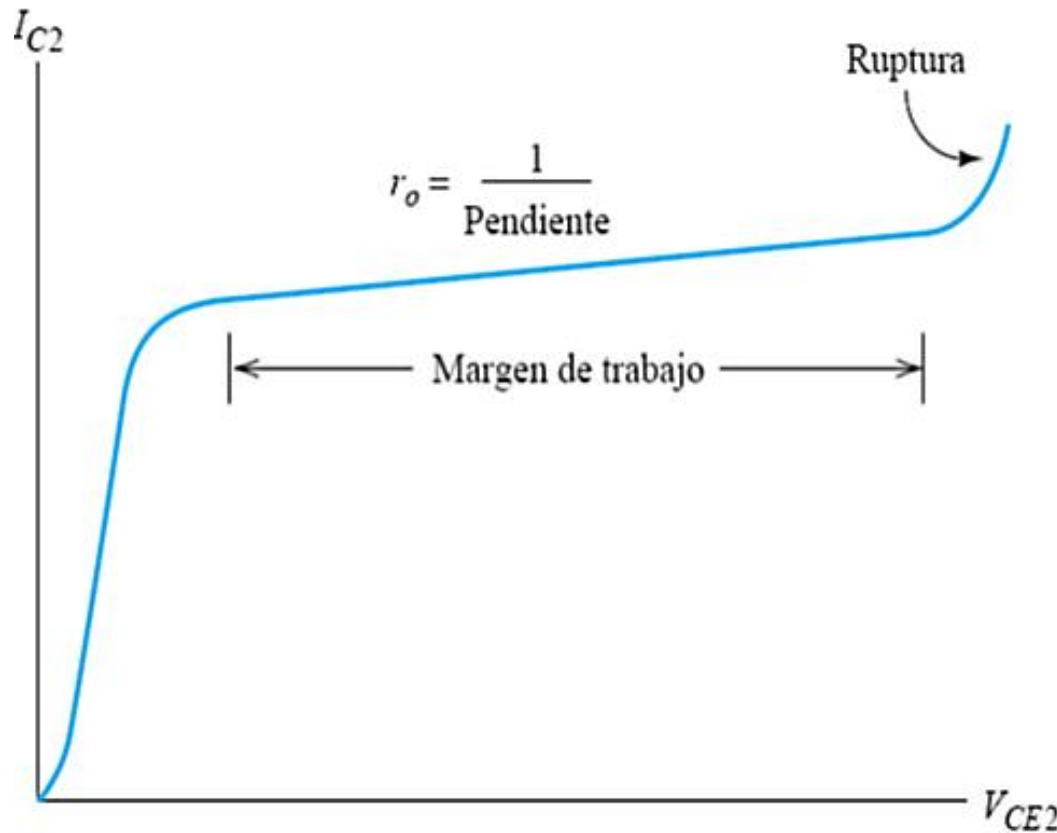
Si  $\beta \gg 1$  se tiene:

$$I_{C1} = I_{C2} \approx I_{ref}$$

$$I_{ref} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R}$$

# 4.1. Espejo de corriente: otros parámetros

- ❑ Otros parámetros de la fuente: tensión de trabajo y  $R_O$ .
  - La salida  $v_{Io}$  de fuente en espejo es  $v_{CE2}$  por tanto:



Tensión mínima de trabajo:

$$v_{Io} = v_{CE2} \geq V_{CEsat}$$

Resistencia interna:

$$R_O = r_{CE2} = r_o = \frac{V_A}{I_O}$$

## 4.2. Fuente Wilson

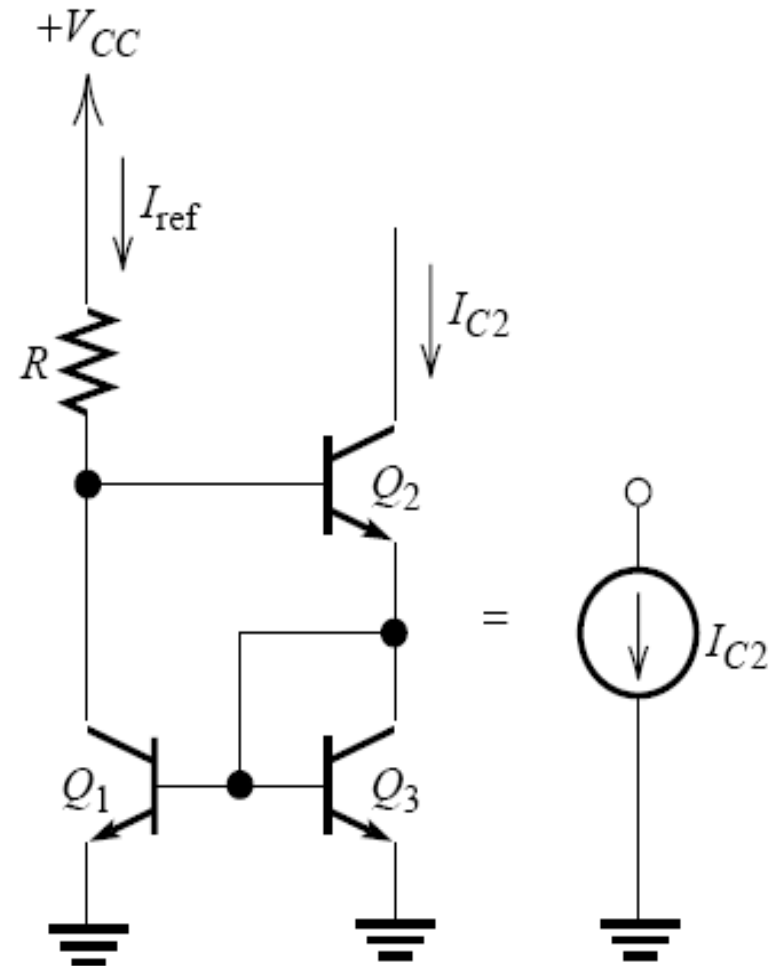
- Posee una **mayor resistencia de salida** que el espejo básico
  - Las fuentes de corriente de alta resistencia, como el circuito Wilson, son muy útiles en la construcción de amplificadores diferenciales de **alto CMRR**.

$$I_O = I_{C2} \approx I_{ref} = \frac{V_{CC} - V_{BE2} - V_{BE3}}{R}$$

### ■ **Actividad de estudio:**

Obtenga los parámetros de interés de la fuente Wilson:

- Resistencia de salida  $R_O$
- Margen de trabajo  $V_{Io}$



## 4.3. Fuente Widlar: características.

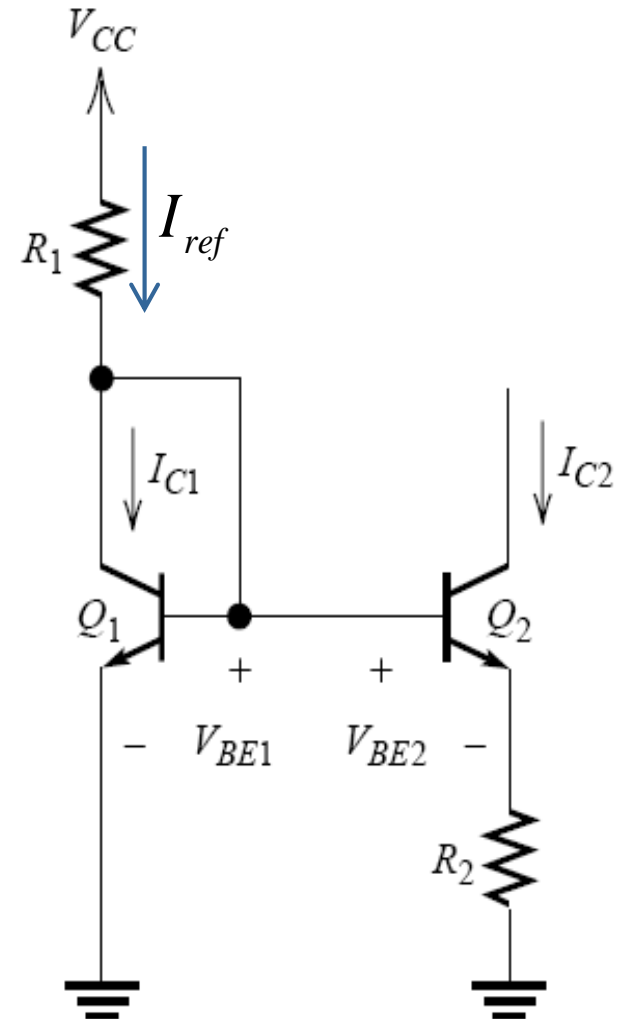
- ❑ Permite corrientes de salida de valores bajos, inferiores a  $I_{ref}$ 
  - Valores bajos de corriente interesan por razones de consumo y potencia disipada.
  - Para fuentes de corriente de bajo valor,  $R_1 \uparrow \uparrow \rightarrow$  el área ocupada en el chip por dicha  $R$  sería muy elevada.

Con ambos trt's iguales y en activa se tiene:

$$I_{C1} = I_S e^{\left(\frac{V_{BE1}}{V_T}\right)} \Rightarrow V_{BE1} = V_T \ln\left(\frac{I_{C1}}{I_S}\right)$$

$$I_{C2} = I_S e^{\left(\frac{V_{BE2}}{V_T}\right)} \Rightarrow V_{BE2} = V_T \ln\left(\frac{I_{C2}}{I_S}\right)$$

siendo:  $V_{BE1} = V_{BE2} + R_2 I_{E2}$



## 4.3. Fuente Widlar: características (2).

Aproximando, considerando betas muy grandes:

$$V_{BE1} \approx V_{BE2} + R_2 I_{C2} = V_{BE2} + R_2 I_O$$

Sustituyendo  $V_{BE1}$  y  $V_{BE2}$  por sus expresiones en función de  $I_{C1}$  e  $I_{C2}$  se obtiene:

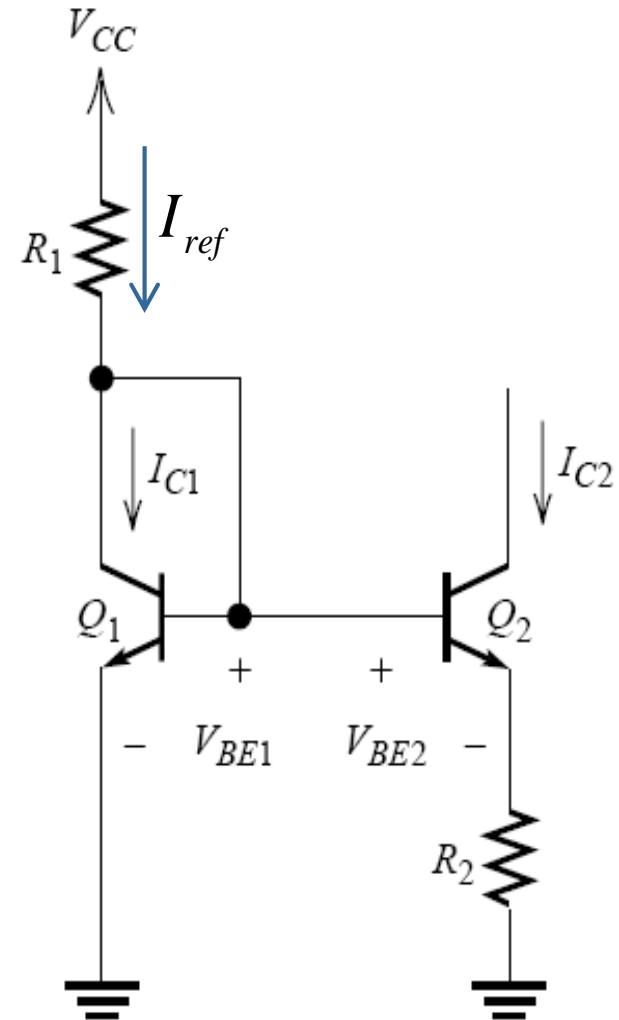
$$V_T \ln\left(\frac{I_{C1}}{I_S}\right) = V_T \ln\left(\frac{I_{C2}}{I_S}\right) + R_2 I_{C2}$$

y despejando  $R_2$ :

$$R_2 \approx \frac{V_T}{I_{C2}} \ln\left(\frac{I_{C1}}{I_{C2}}\right)$$

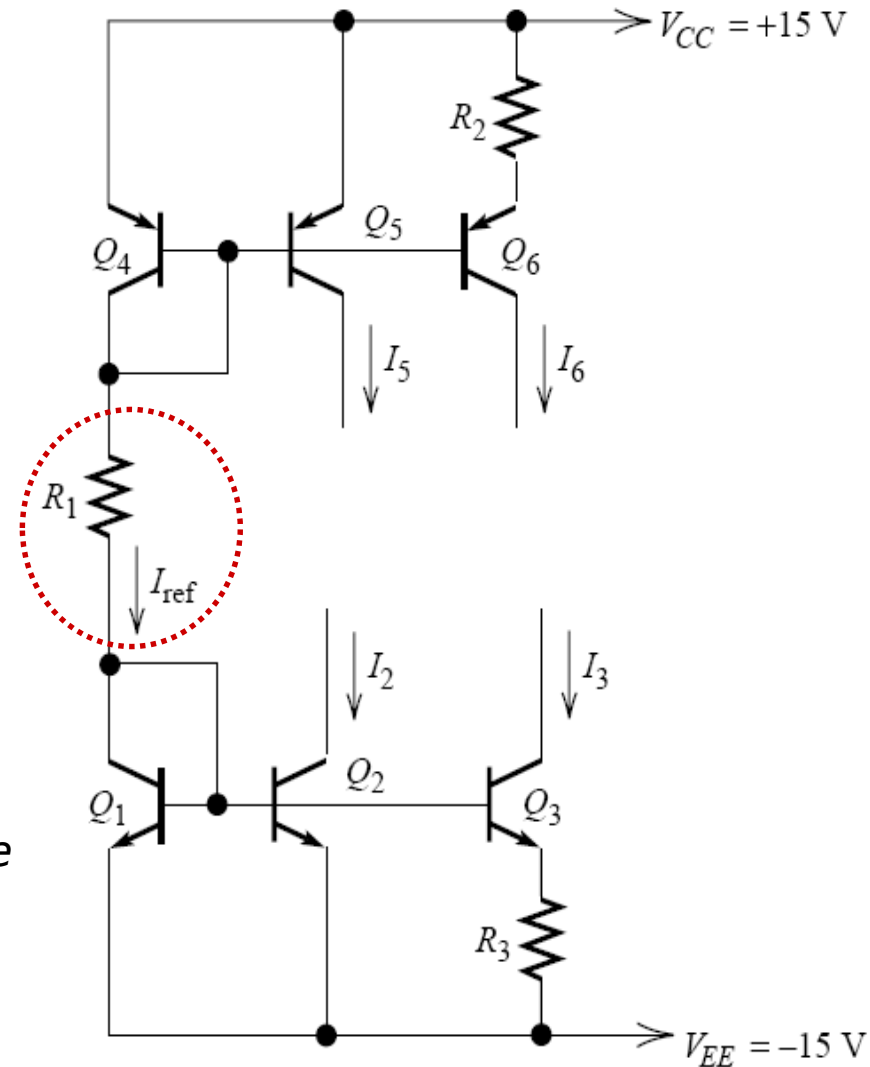
Y despreciando las corrientes de base, se tiene además que:

$$I_{C1} \approx I_{ref} = \frac{V_{CC} - V_{BE1}}{R_1}$$



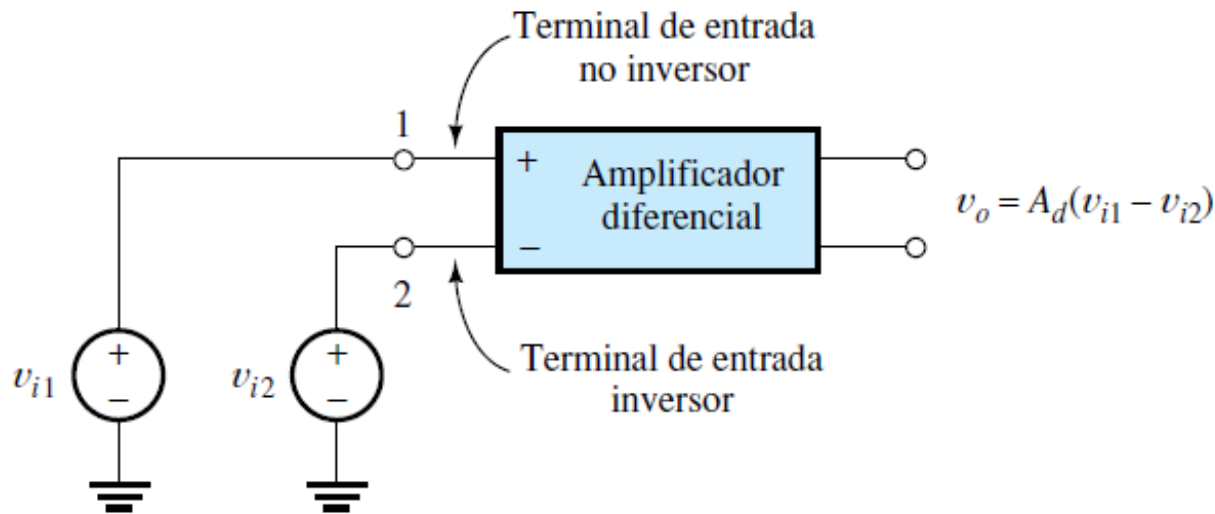
## 4.4. Fuentes múltiples

- En un amplificador integrado, varias fuentes pueden utilizar la misma corriente de referencia.
  - La corriente a través de  $R_1$  sirve como referencia para las cuatro fuentes de corriente.
  - $Q_1$  y  $Q_2$  forman un espejo de corriente básico.
  - $Q_1$  y  $Q_3$  forman una fuente Widlar (donde  $I_3 < I_{ref}$ )
  - El mismo funcionamiento se tiene para los transistores **pnP**:
    - sólo se diferencian en el sentido de la corriente y en la polaridad de la tensión.



# 5. Amplificadores diferenciales. Introducción

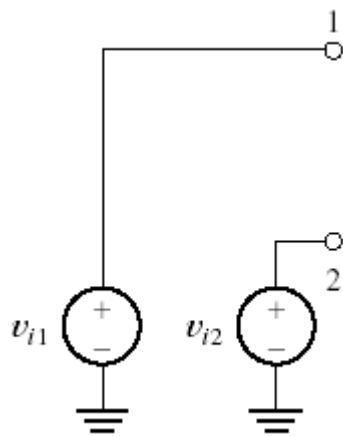
- Son un tipo especial de amplificadores de gran importancia
  - Disponen de **dos entradas** y al menos una salida referidas a masa
  - El más habitual es el amplificador diferencial de tensión.



- El modelo del amplificador diferencial es complejo
  - **Por construcción**, el amplificador reacciona diferente según la forma en la que se relacionan las señales de entrada
  - Esto se caracteriza como los **modos** del diferencial

# 5.1. Amplificadores diferenciales: modos

- ❑ Existen dos **modos** de funcionamiento
  - Modo **diferencial**, referido a 'la diferencia' entre las entradas.
  - Modo **común**, referido a la 'parte común' entre las entradas.
- ❑ Las definiciones y modelo de las entradas son:



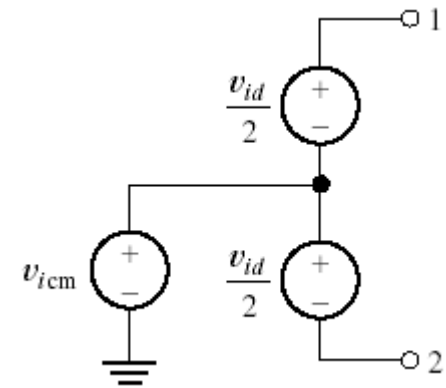
generadores de entrada

definiciones de ambos modos

$$v_{id} = v_{i1} - v_{i2}$$

$$v_{icm} = \frac{1}{2} (v_{i1} + v_{i2})$$

*iEquivalentes!*



modelo para los generadores

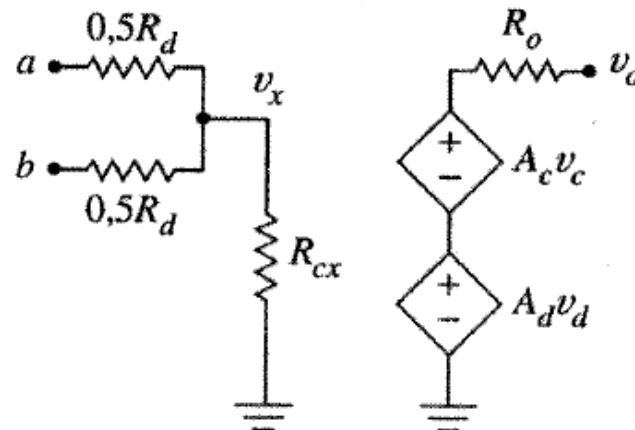


# 5.1. Amplificadores diferenciales: modelo

- ❑ Cada **modo** de funcionamiento tiene una ganancia distinta
  - La ganancia **diferencial** y la ganancia **común**. En consecuencia, la salida del amp. diferencial es una combinación de ambos modos:

$$v_o = v_{od} + v_{oc} = A_d v_{id} + A_c v_{icm}$$

- Incluyendo las impedancias de entrada (diferentes según el modo) se **define** el modelo completo para el amplificador diferencial:



Normalmente:

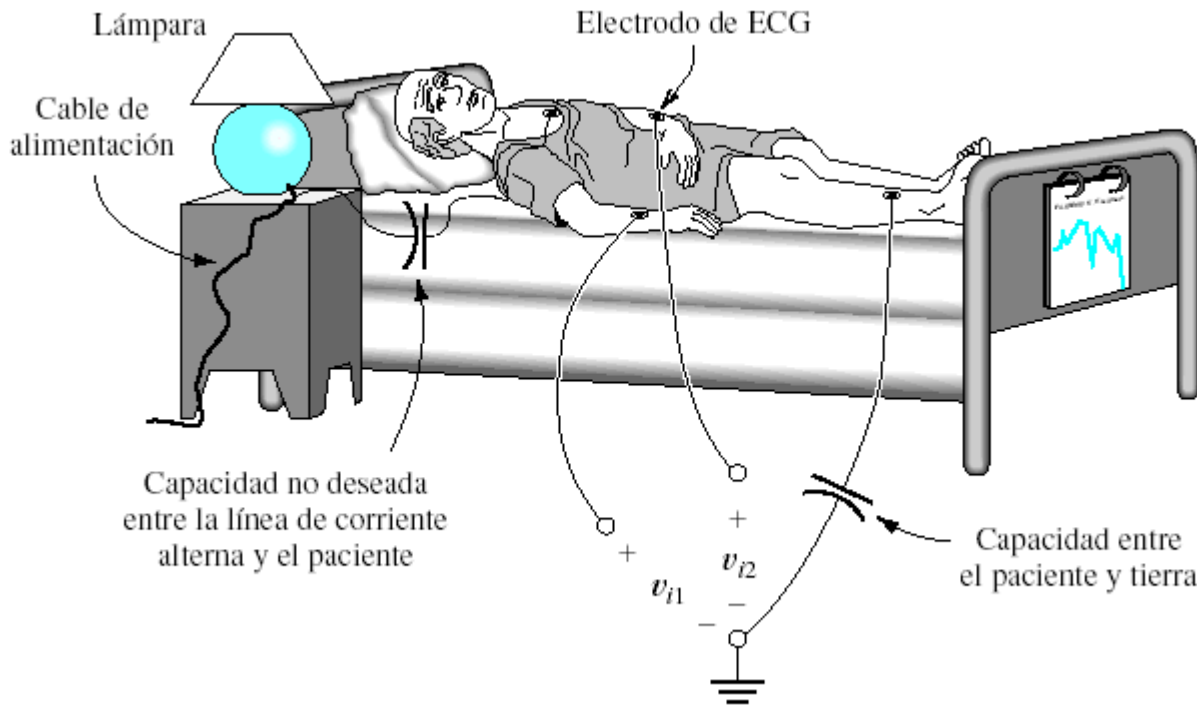
$$A_d \gg A_c$$

$$R_{cx} \gg$$

- **Ejercicio.** Simplifique el modelo del A. diferencial para los casos:
  - Señal de entrada sólo en modo diferencial.
  - Señal de entrada sólo en modo común.

# 5.1. Amplificadores diferenciales: aplicaciones

- ❑ Los amplificadores diferenciales son muy importantes...
  - Sobre todo en aplicaciones donde el **ruido** enmascara la señal
  - Si el ruido es **parte común**, se amplifica mucho menos que la **parte diferencial** (señal útil).
- ❑ Un caso típico son los amplificadores de ECG:



## **Actividad:**

¿Qué fuente de ruido se tiene en este caso?

¿De qué frecuencia es la señal de ruido?

## 5.1. Amplificadores diferenciales: CMRR

- ❑ El mismo caso que el ECG es habitual en medidas de sensores
  - La característica que más interesa del amplificador diferencial es su capacidad para *eliminar* la componente de señal común
  - Esta capacidad se puede cuantificar fácilmente relacionando las ganancias diferencial y común.
  - A la relación entre ambas, se la define como **Relación de Rechazo al Modo Común** (*Common Mode Rejection Ratio* = **CMRR**):

$$CMRR = \frac{|A_d|}{|A_c|} \qquad CMRR_{(dB)} = 20 \log \frac{|A_d|}{|A_c|}$$

- ❑ Los fabricantes dan como datos  $A_d$  y CMRR (ésta, normalmente en dB)
  - Ejercicio:
    - *A un diferencial con  $A_d=100$  y  $CMRR = 120dB$ , se aplica una señal de entrada de  $10mV$  con un ruido común de  $500mV$ : ¿Qué señales tenemos finalmente en la salida? ¿Qué relación hay entre ambas?*

# 5.1. Amplificadores diferenciales: ejercicio

## □ Ejercicio 1.38 (Malik)

Se muestra el modelo para un amplificador diferencial con una fuente de señal doble.

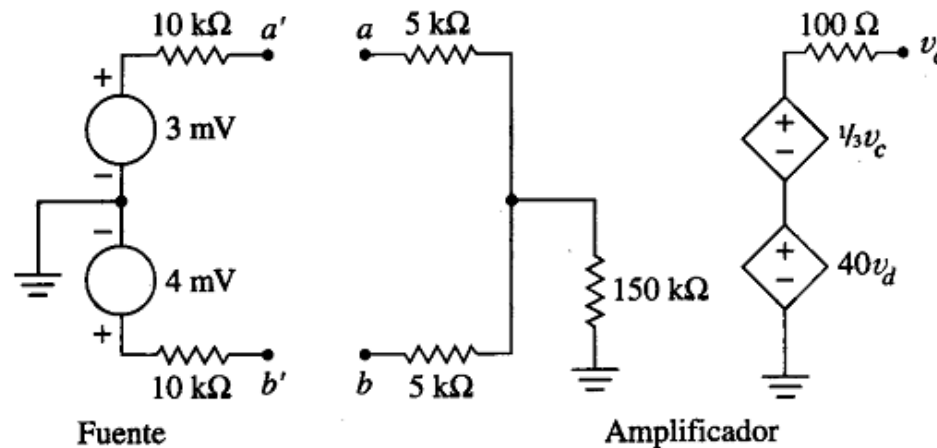
a) ¿Cuáles son los valores de  $A_d$ , RRMC,  $R_d$  y  $R_c$  ?

b) Halle la componente en modo diferencial de  $v_o$

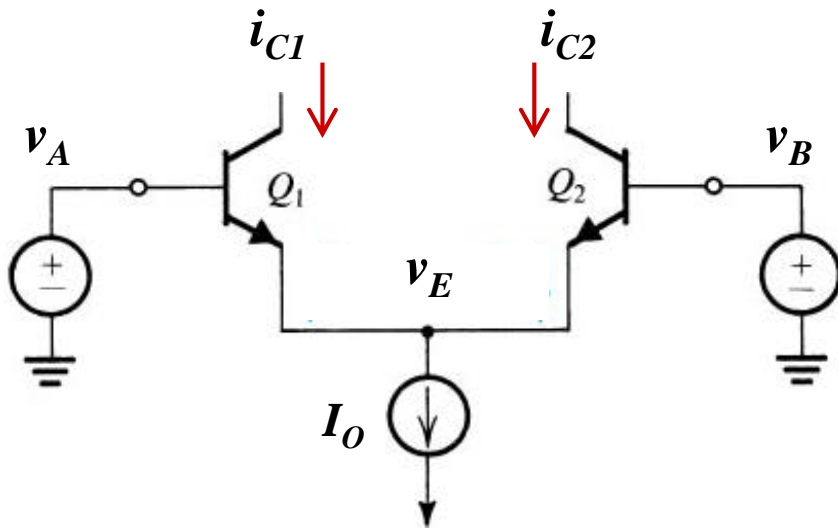
c) Halle el componente en modo común de  $v_o$

d) Halle el valor de  $v_o$

e) Halle el nuevo valor de  $v_o$  si la salida del amplificador se conecta a tierra a través de una resistencia de carga de  $800 \Omega$ .



## 5.2. Par diferencial: análisis en gran señal.



- ❑ Base de los amp. diferenciales
- ❑ Funcionamiento:
  - Los transistores sólo deben funcionar en **activa** o corte.
    - Si se saturasen, dejaría de funcionar como diferencial.
  - Las salidas (colectores) han de conectarse de modo **que se garantice** la zona activa.

- ❑ Análisis en gran señal (*función de transferencia*):

$$i_{C1} = I_{S1} \cdot e^{v_{BE1}/V_{T1}} = I_{S1} \cdot e^{(v_A - v_E)/V_{T1}}$$

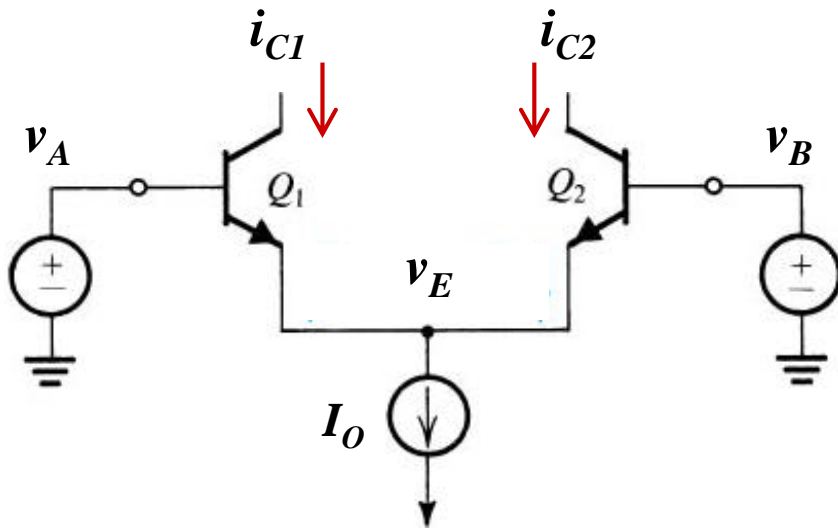
$$i_{C2} = I_{S2} \cdot e^{v_{BE2}/V_{T2}} = I_{S2} \cdot e^{(v_B - v_E)/V_{T2}}$$

$$I_{S1} = I_{S2} = I_S$$

$$V_{T1} = \left( \frac{kT}{q} \right) = V_{T2} = V_T$$

Con  $Q_1$  y  $Q_2$  **iguales** y a la **misma T**:

## 5.2. Par diferencial: análisis en gran señal.



$$i_{C1} = I_S \cdot e^{(v_A - v_E)/V_T}$$

$$i_{C2} = I_S \cdot e^{(v_B - v_E)/V_T}$$

$$\frac{i_{C1}}{i_{C2}} = e^{(v_A - v_B)/V_T} = e^{v_D/V_T}$$

- Aplicando 2º lema de Kirchhoff (corrientes) en emisores:

$$i_{E1} + i_{E2} = I_O \approx i_{C1} + i_{C2}$$

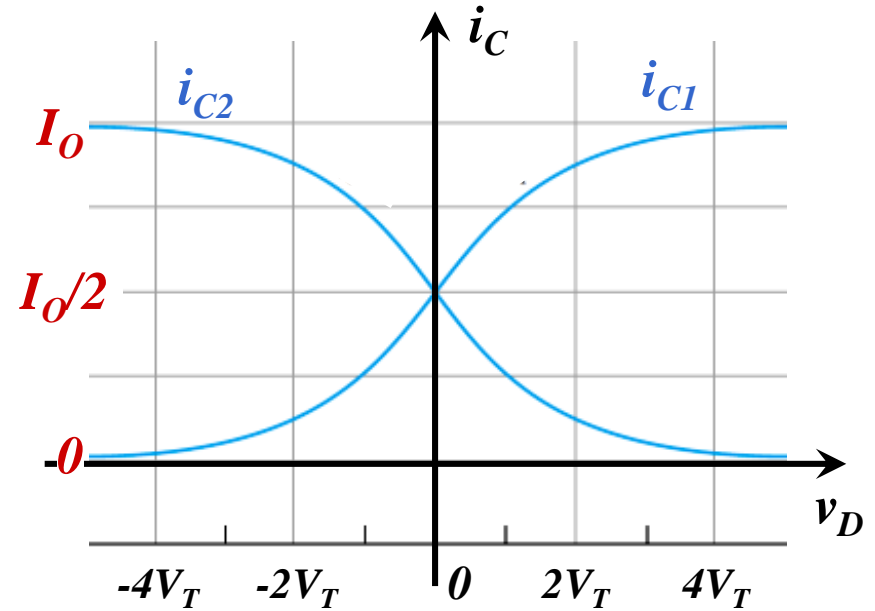
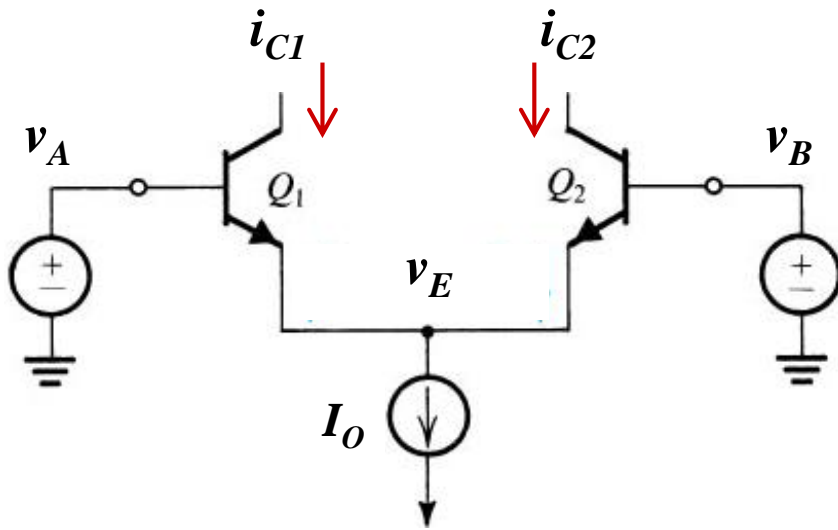
despejando en función de  $i_{C1}$  queda...

$$i_{C1} = I_O - i_{C2} = I_O - i_{C1} \cdot e^{-v_D/V_T}$$



$$i_{C1} = \frac{I_O}{1 + e^{-v_D/V_T}}$$

## 5.2. Función de transferencia.



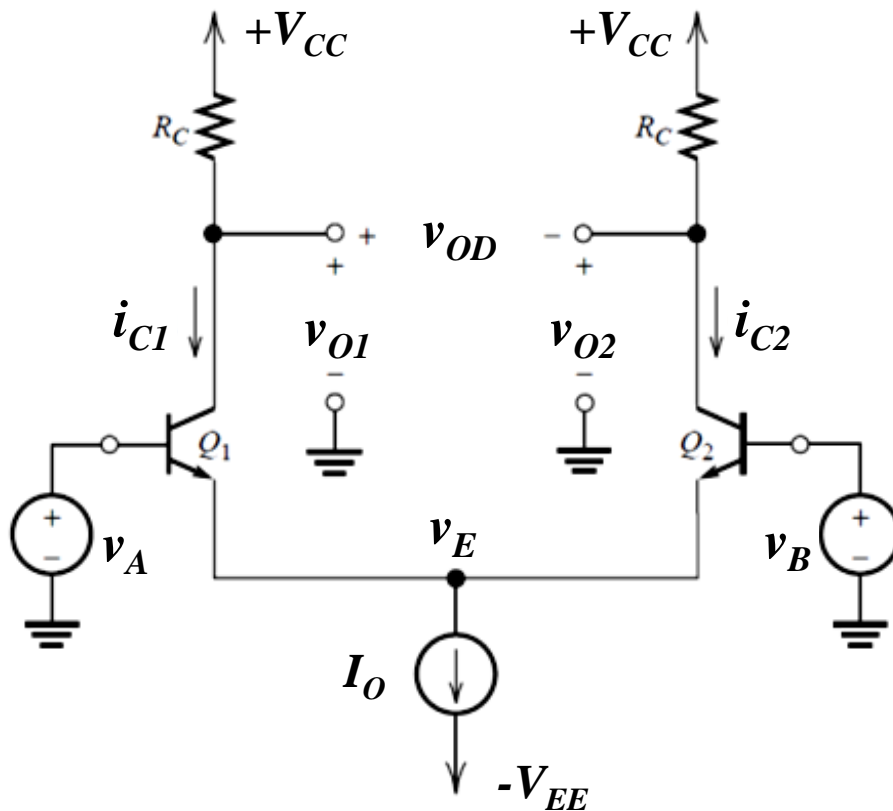
Las f. de t. de transconductancia,  $i_C = f(v_D)$ , para ambas salidas son:

$$i_{C1} = \frac{I_O}{1 + e^{-v_D/V_T}}$$

$$i_{C2} = \frac{I_O}{1 + e^{+v_D/V_T}}$$

## 5.3. Amplificador diferencial básico, con $R_C$ .

- ❑ Diferencial básico, con resistores en colector.
  - El montaje con  $V_{CC}$  y  $R_C$  permite pasar las corrientes  $i_C$  a tensión y mantener los Q's en activa.



- Tres formas de obtener una tensión de salida:

### Salidas asimétricas

$$v_{O1} = V_{CC} - i_{C1}R_C$$

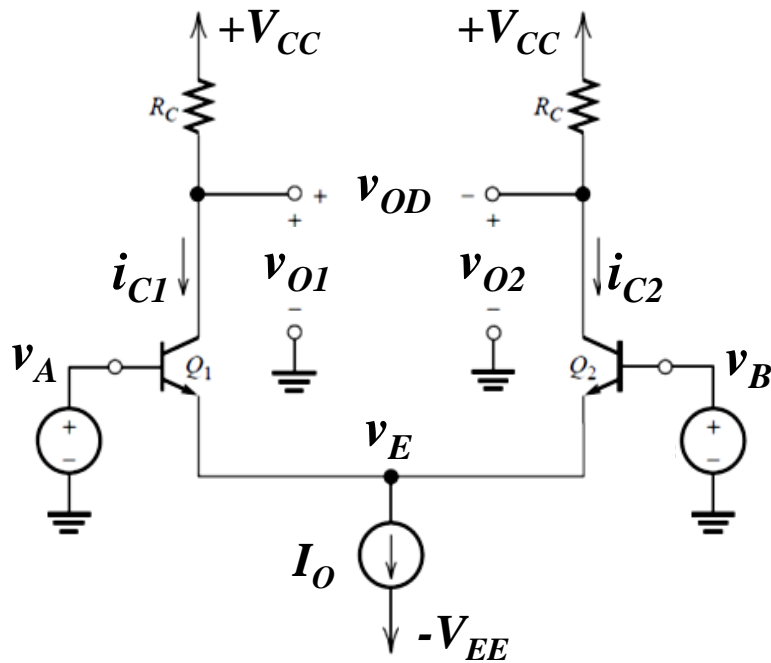
$$v_{O2} = V_{CC} - i_{C2}R_C$$

### Salida simétrica o diferencial

$$v_{OD} = v_{O1} - v_{O2} = (i_{C2} - i_{C1})R_C$$



## 5.3. Diferencial básico: salida diferencial.



- Obtención de la función de transferencia:  $v_{OD} = f(v_A - v_B) = f(v_D)$

$$v_{OD} = (i_{C2} - i_{C1})R_C$$

$$I_O \approx i_{C1} + i_{C2}$$

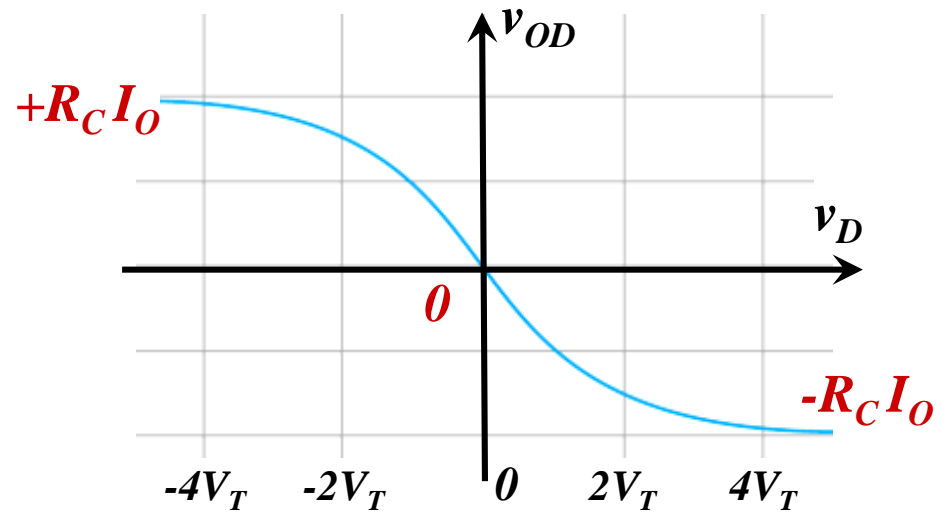
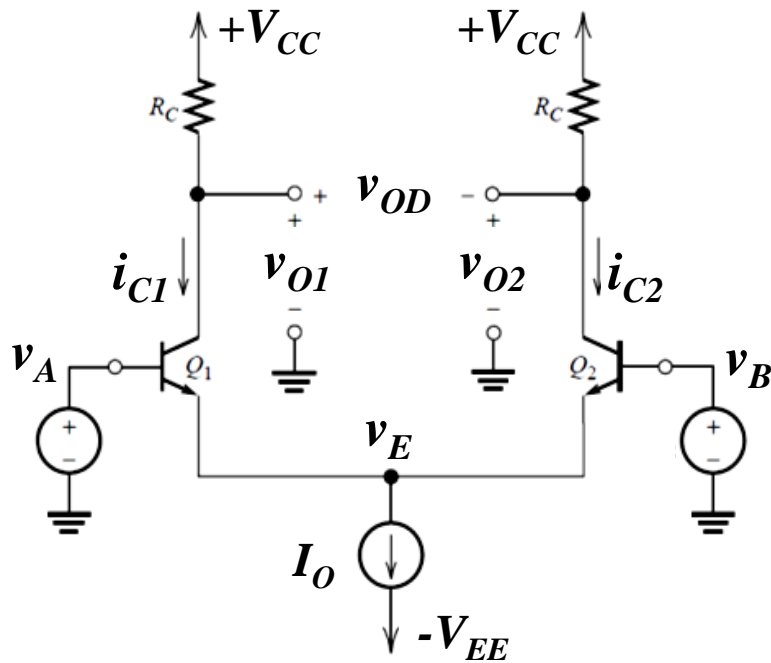
$$i_{C2} - i_{C1} = 2i_{C2} - I_O$$

$$i_{C2} = \frac{I_O}{1 + e^{+v_D/V_T}}$$



$$v_{OD} = R_C \left( \frac{2I_O}{1 + e^{+v_D/V_T}} - I_O \right) = R_C I_O \frac{1 - e^{+v_D/V_T}}{1 + e^{+v_D/V_T}} = -R_C I_O \tanh \left( \frac{v_D}{2V_T} \right)$$

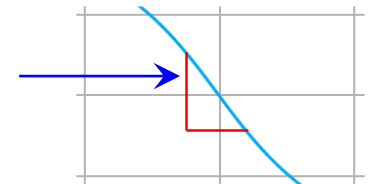
## 5.3. Diferencial básico: salida diferencial.



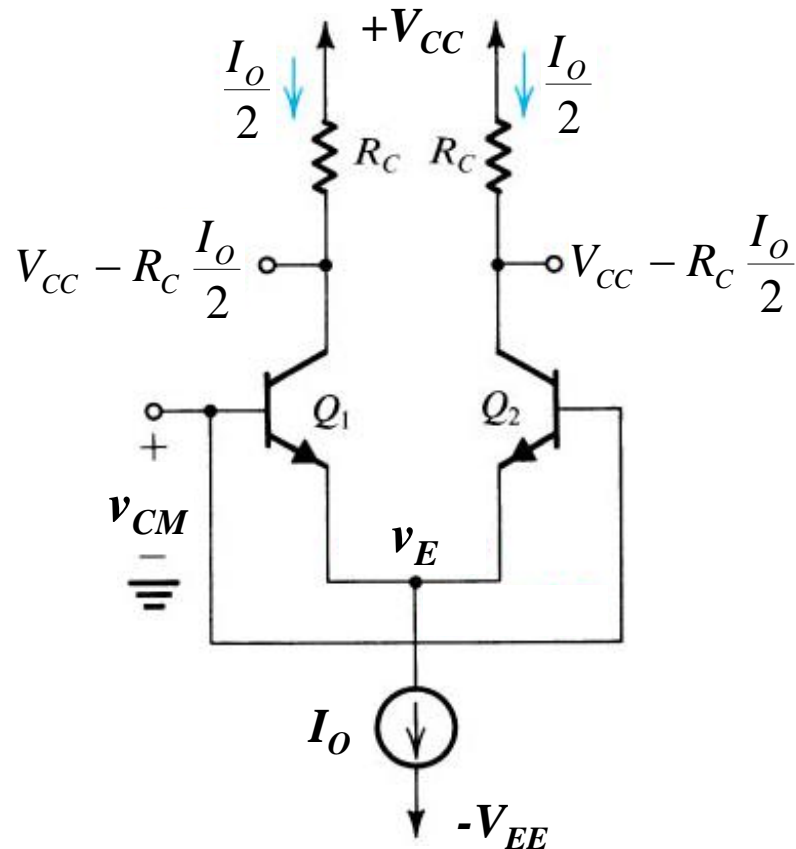
$$v_{OD} = -R_C I_O \tanh\left(\frac{v_D}{2V_T}\right)$$

- Ganancia en pequeña señal, en el **mejor punto de trabajo** (0,0):

$$G_d = \frac{v_{od}}{v_d} = \left(\frac{dv_{OD}}{dv_D}\right)_{(0,0)} = -R_C \frac{I_O}{2V_T} = -R_C \frac{I_C}{V_T} = -g_m R_C$$

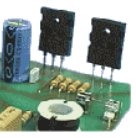


## 5.3. Diferencial básico: polarización.



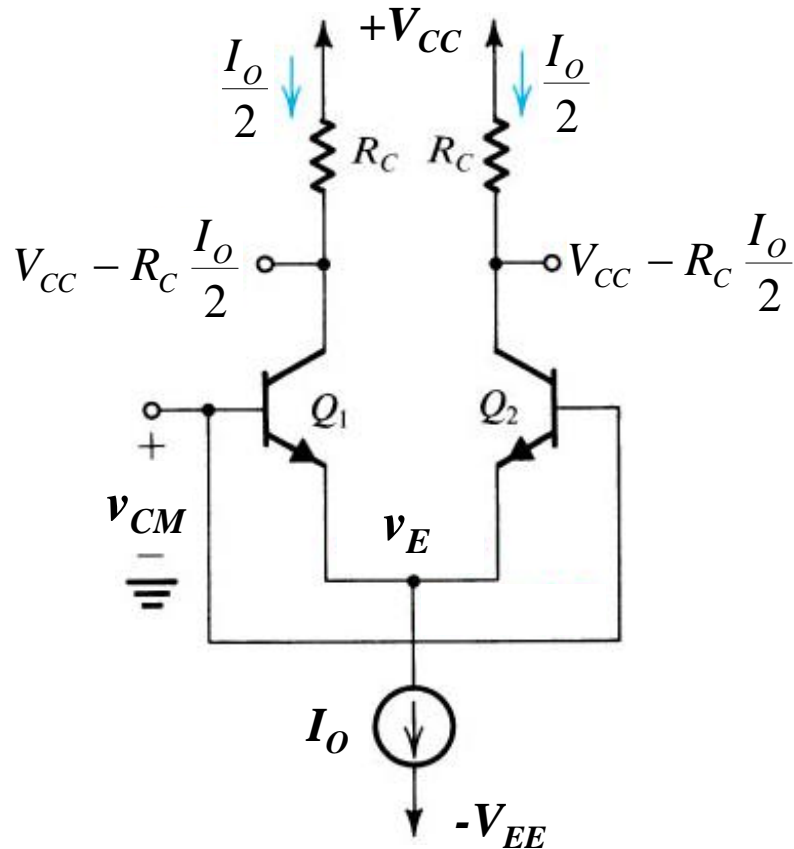
- El mejor punto de trabajo, por defecto, es el equilibrio:  $v_D = 0$ .
  - Pero además, hay que garantizar el funcionamiento del diferencial.
  - Con  $v_D = 0$  tiene que haber una tensión continua,  $v_{CM}$ , tal que  $Q_1$  y  $Q_2$  estén en activa.
  - Los valores válidos de esta  $v_{CM}$  determinan el **margen de entrada en modo común**.
  - Estos límites son diferentes en cada circuito.

# 5.3. Diferencial básico: polarización.



□ Para el circuito de la figura:

■ Límite superior marcado por la saturación de los transistores



$$v_{CE} \geq V_{CEsat} \approx 0,2V$$

$$v_{CE} = v_C - v_E = \left( V_{CC} - \frac{I_O}{2} R_C \right) - v_E$$

$$v_E = v_{CM} - V_{BE}$$

$$v_{CM} \leq \left( V_{CC} - \frac{I_O}{2} R_C \right) + V_{BE} - V_{CEsat}$$

■ Límite inferior, marcado por  $I_O$

$$v_{I_o} = v_E + V_{EE} = v_{CM} - V_{BE} + V_{EE} \geq V_{I_o \min}$$

$$v_{CM} \geq V_{I_o \min} + V_{BE} - V_{EE}$$

## 5.4. El diferencial en pequeña señal

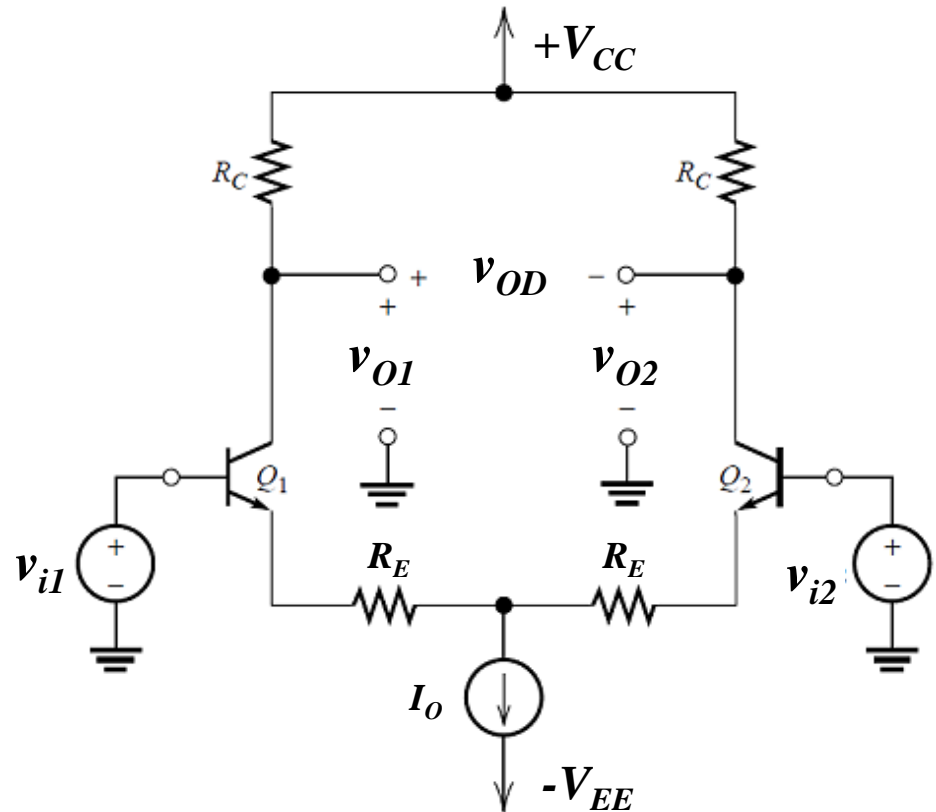
- Conocido el punto de trabajo ( $I_C = I_O/2$ ) se obtienen fácilmente los parámetros del diferencial en pequeña señal.
  - Diferencial definido por:  $Z_d$ ,  $Z_c$ ,  $Z_s$ ,  $A_d$ ,  $A_c$ , **CMRR**, *etc.* (ver trp. 14)
  - El análisis se simplifica, con técnicas específicas.

### □ Un ejemplo:

- Diferencial con  $R$  de emisor
- Esta  $R_E$  proporciona mayor  $Z_e$  y mayor margen lineal que el diferencial básico, a costa de menor ganancia. (*Hambley, sección 7.5*)
- Análisis genérico, para ambos modos (trp. 22):

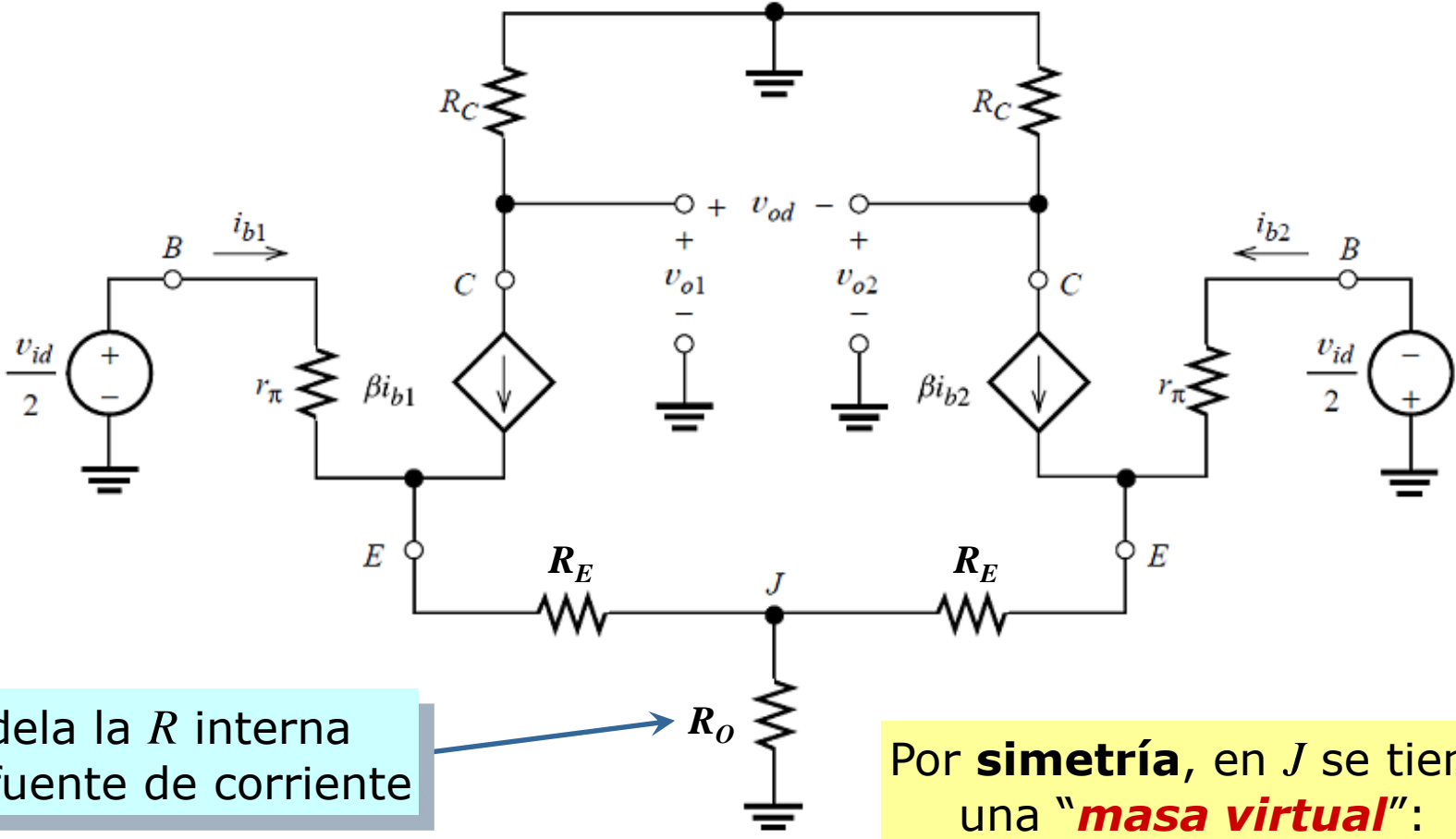
$$v_d = v_{i1} - v_{i2}$$

$$v_c = (v_{i1} + v_{i2}) / 2$$



# 5.4. Modo diferencial

En este modo se tiene:  $v_c = 0, v_{i1} = -v_{i2} = v_d/2$

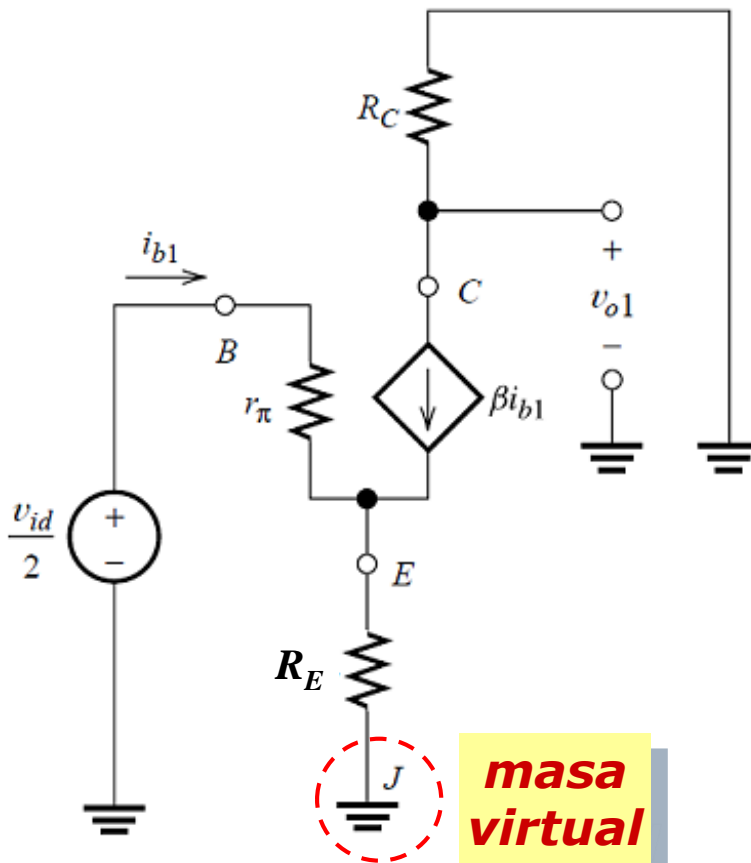


Modela la  $R$  interna de la fuente de corriente

Por **simetría**, en  $J$  se tiene una "**masa virtual**":  
 $V_J = 0 \Rightarrow I_{REB} = 0$

## 5.4. Análisis de semicircuito (m. diferencial)

- La simetría del problema permite una resolución rápida
  - Análisis de "**semicircuito**": se analiza una mitad y se identifican posteriormente los resultados con el modelo (trp. 14)



$$\rightarrow \begin{cases} Z_{i1} = r_{\pi} + (\beta + 1)R_E \\ Z_{o1} = R_C \\ A_{d1} = \frac{v_{o1}}{v_{id}} = -\frac{\beta R_C}{2[r_{\pi} + (\beta + 1)R_E]} \end{cases}$$

Atención: si se dan las condiciones adecuadas,  $A_d$  sólo dependería de los resistores fijos:

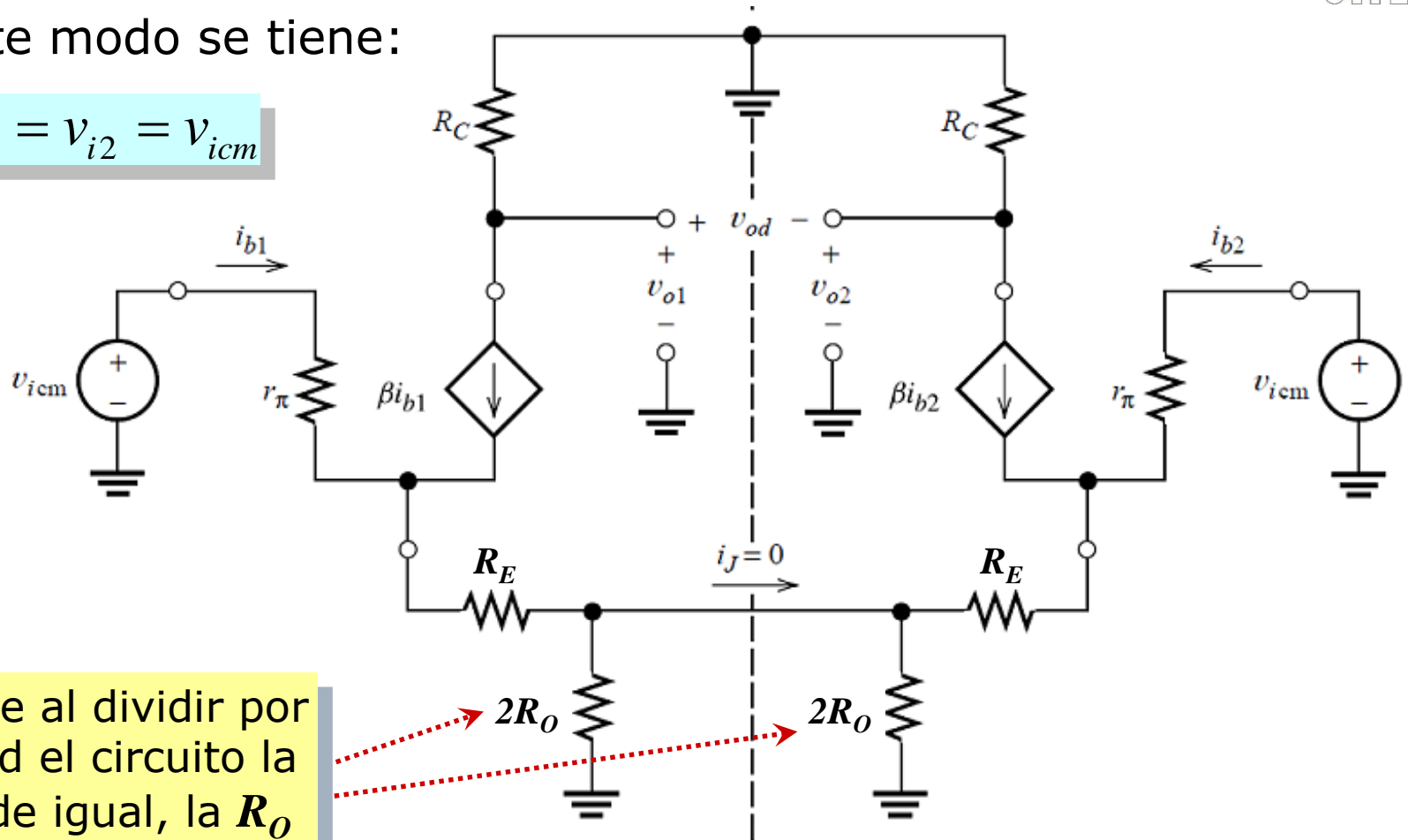
$$(\beta + 1)R_E \gg r_{\pi}$$

$$\hookrightarrow A_{d1} \approx -\frac{\beta R_C}{2(\beta + 1)R_E} \Big|_{\beta \gg 1} \approx -\frac{R_C}{2R_E}$$

# 5.4. Modo común

En este modo se tiene:

$$v_{i1} = v_{i2} = v_{icm}$$



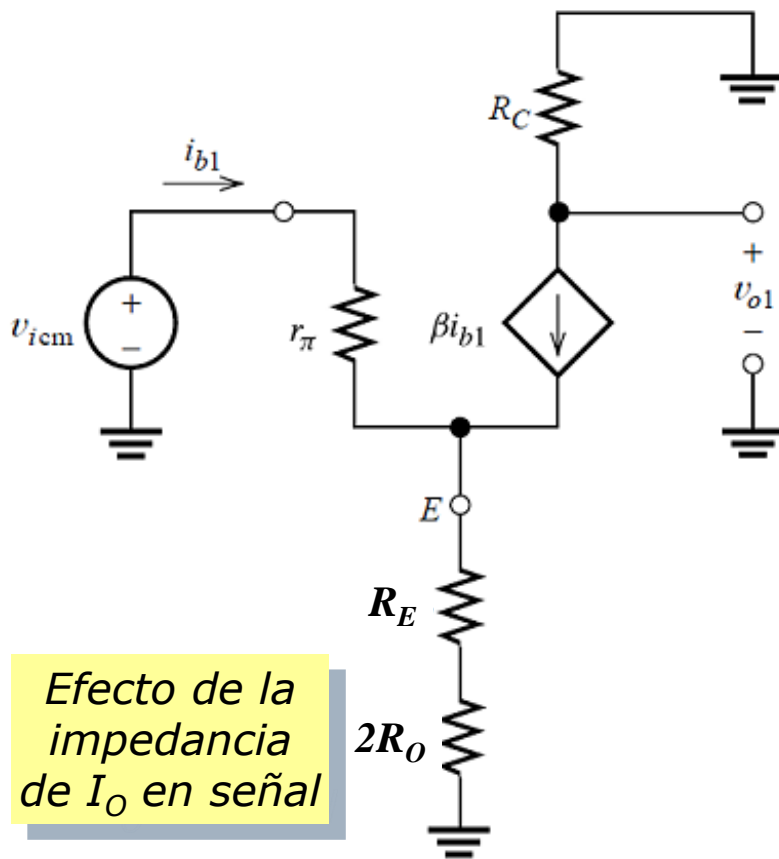
Para que al dividir por la mitad el circuito la  $V_J$  quede igual, la  $R_O$  ha de  **duplicarse**.

Por  **simetría**, en  $J$  se tiene  $i_J = 0$



# 5.4. Análisis de semicircuito (m. común)

- Análisis similar al caso diferencial
  - Hay que prestar especial atención a combinar acertadamente los resultados parciales de semicircuito



$$\left\{ \begin{aligned} Z_{cm1} &= r_{\pi} + (\beta + 1)(R_E + 2R_O) \\ Z_{o1} &= R_C \\ A_{cm1} &= \frac{v_{o1}}{v_{icm}} = - \frac{\beta R_C}{r_{\pi} + (\beta + 1)(R_E + 2R_O)} \end{aligned} \right.$$

*En condiciones normales la  $R_O$  de la fuente de corriente es muy alta: por tanto  $r_{\pi}$  es despreciable.*

*Si además  $\beta \gg 1 \rightarrow A_{cm1}$  no depende de  $\beta$ :*

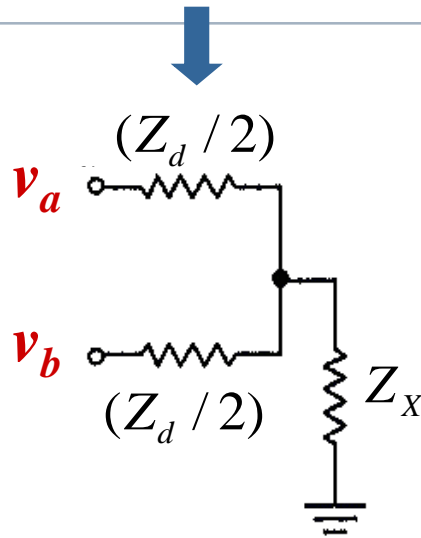
$$A_{cm1} = - \frac{R_C}{R_E + 2R_O}$$

# 5.4. Modelo del diferencial con $R_E$

Combinando adecuadamente los análisis de cada semicircuito:

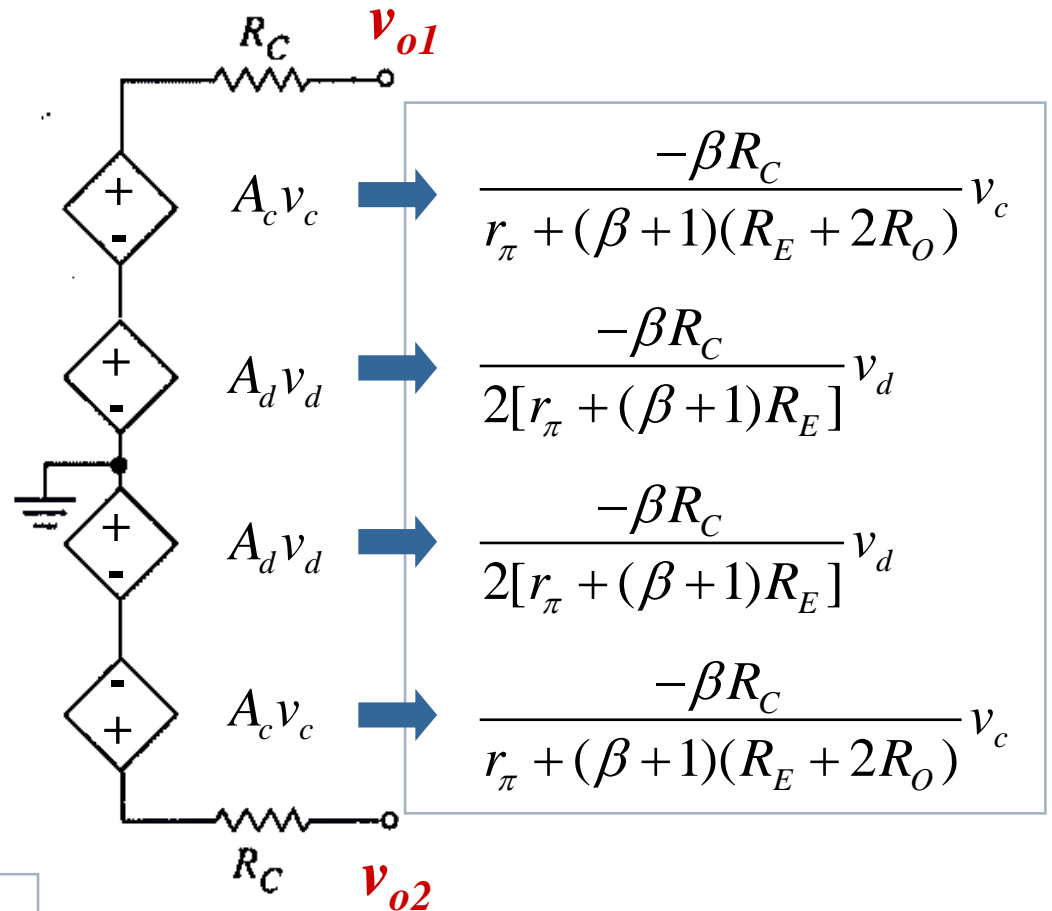
$$(Z_d/2) \rightarrow Z_{i1} = r_\pi + (\beta + 1)R_E$$

$$(Z_d/2) \rightarrow Z_{i2} = r_\pi + (\beta + 1)R_E$$



$$Z_{cm} = \frac{Z_d}{4} + Z_X$$

$$Z_{cm} = \frac{1}{2} [r_\pi + (\beta + 1)(R_E + 2R_O)]$$

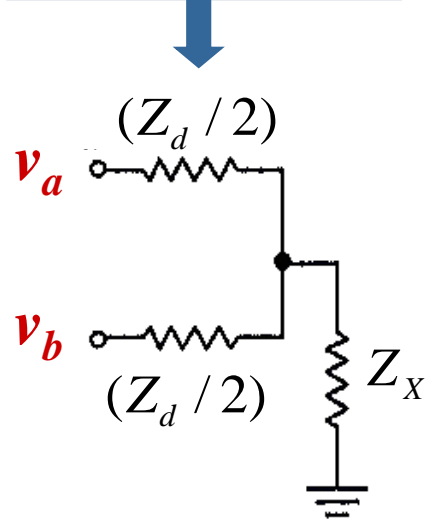


# 5.4. Modelo del diferencial básico

- Simplificación del anterior, eliminando  $R_E$  (recordar que:  $g_m r_\pi = \beta$ )

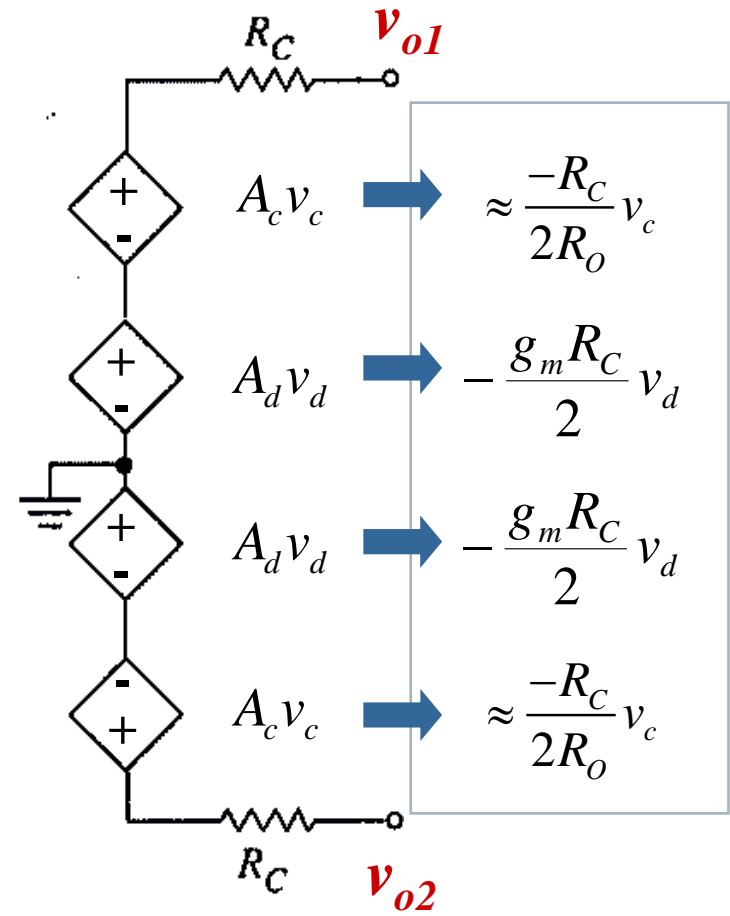
$$(Z_d/2) \rightarrow Z_{i1} = r_\pi$$

$$(Z_d/2) \rightarrow Z_{i1} = r_\pi$$



$$Z_{cm} = \frac{Z_d}{4} + Z_X$$

$$Z_{cm} = \frac{r_\pi}{2} + (\beta + 1)R_O$$



## 5.5. Análisis del CMRR

- ❑ En un amplificador diferencial el CMRR es un **factor de mérito**
  - Define la calidad del diferencial.
  
- ❑ Si la simetría del circuito fuera ideal
  - ¡El CMRR en **salida diferencial** sería infinito!
  - Esto es así dado que se cancelan mutuamente ambas componentes comunes.
    - *En la práctica, hay diferencias y en consecuencia sí hay señal de salida.*
  - Sólo tiene sentido hablar del CMRR en salida asimétrica. En el diferencial básico (sin  $R_E$ ):

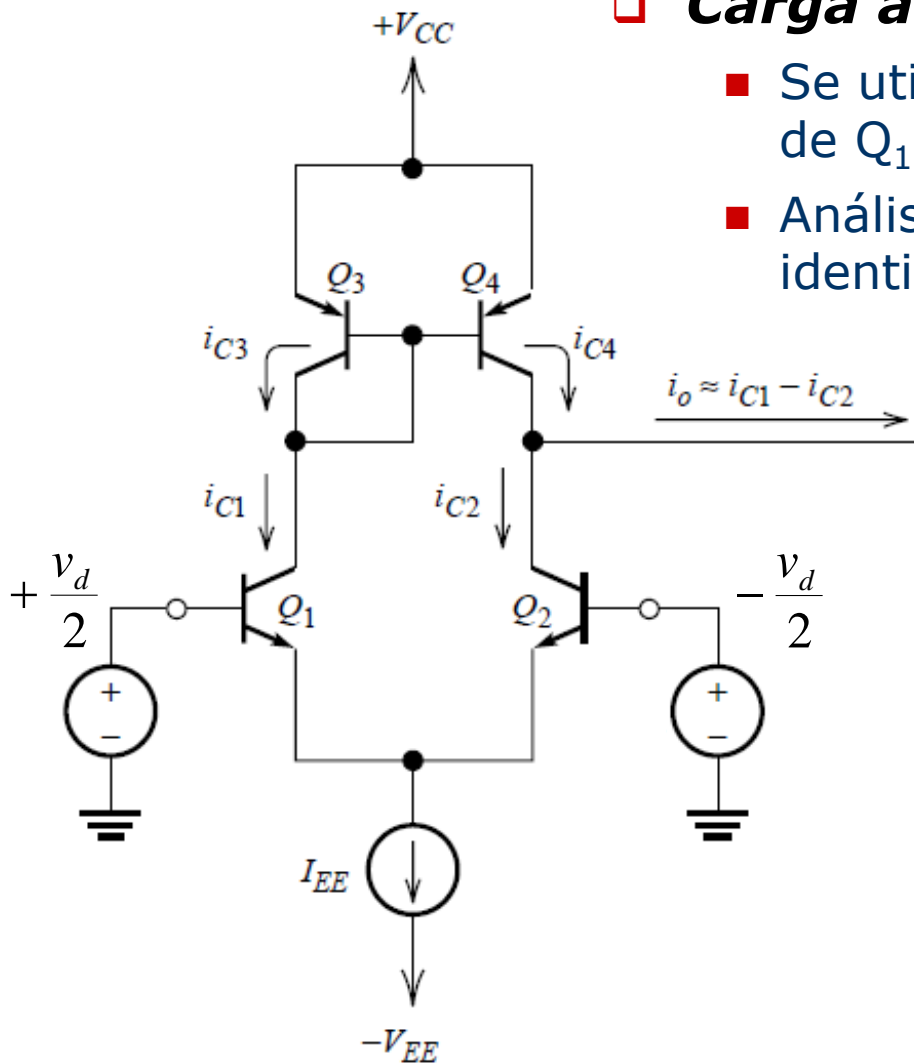
$$CMRR \Rightarrow \left| \frac{A_d - \text{una salida}}{A_c - \text{una salida}} \right| = \frac{(g_m R_C) / 2}{R_C / (2R_O)} = g_m R_O$$

La **calidad** de un amplificador diferencial es **directamente proporcional** a la **calidad** ( $R_O$ ) de su **fuelle de corriente**.

# 6. Diferencial con carga activa

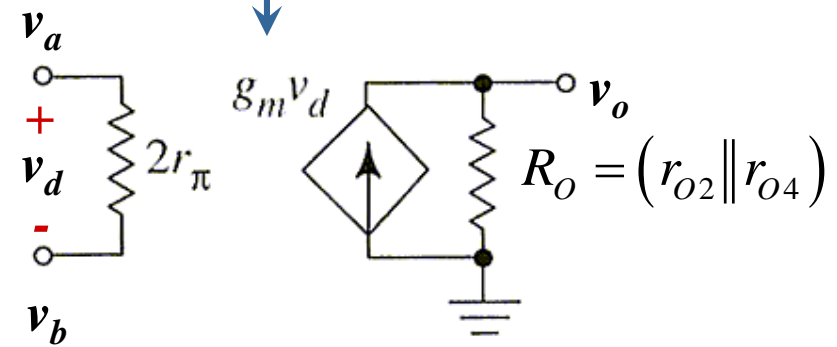
❑ **Carga activa:** con dispositivos  $D$  o  $Q$

- Se utiliza un espejo que lleva la corriente de  $Q_1$  hasta la salida.
- Análisis simplificado en modo diferencial: identificando términos conocidos...



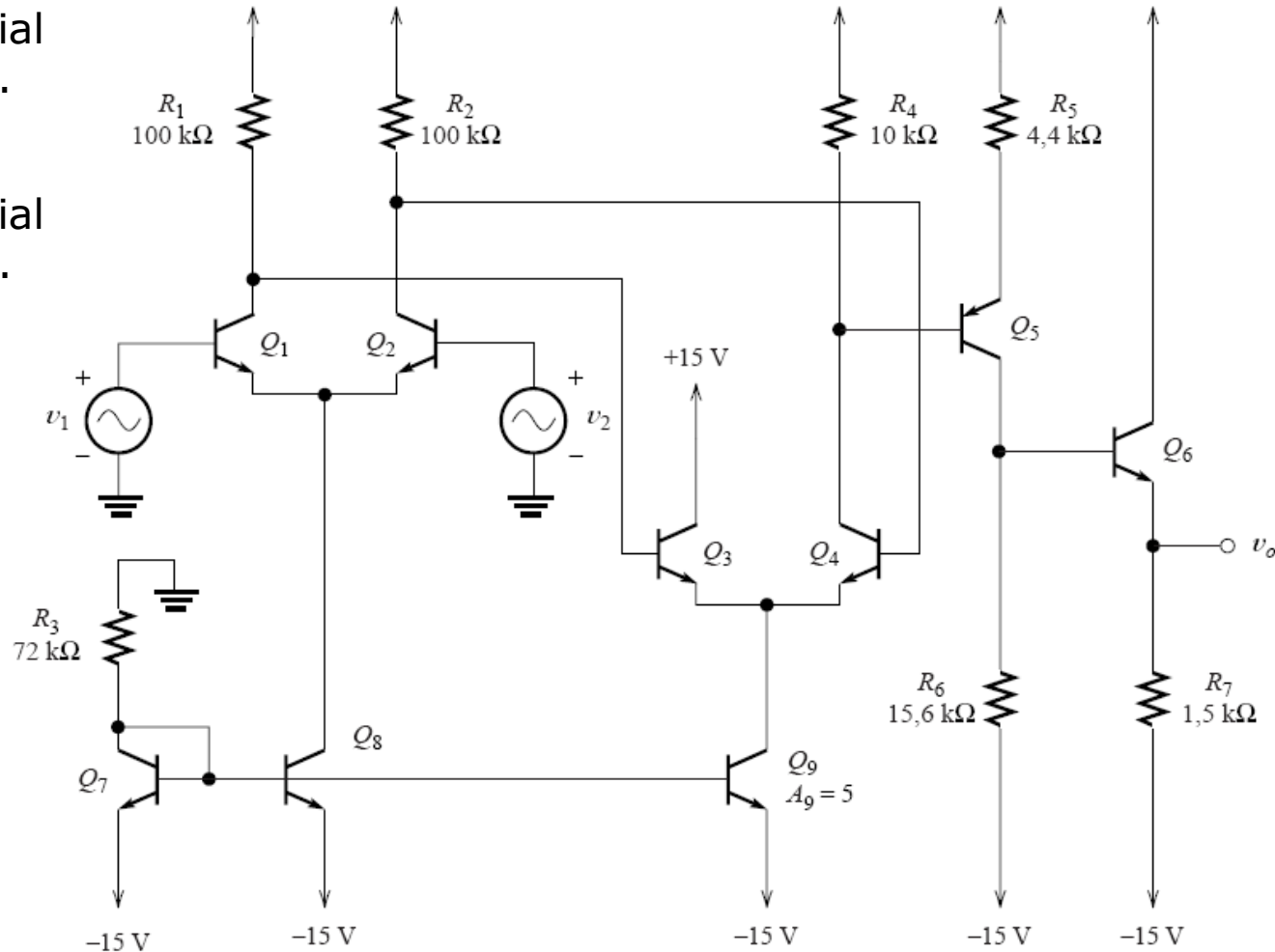
$$i_o = i_{c1} - i_{c2} = g_m \frac{v_d}{2} - \left( -g_m \frac{v_d}{2} \right)$$

$$i_o = g_m v_d$$



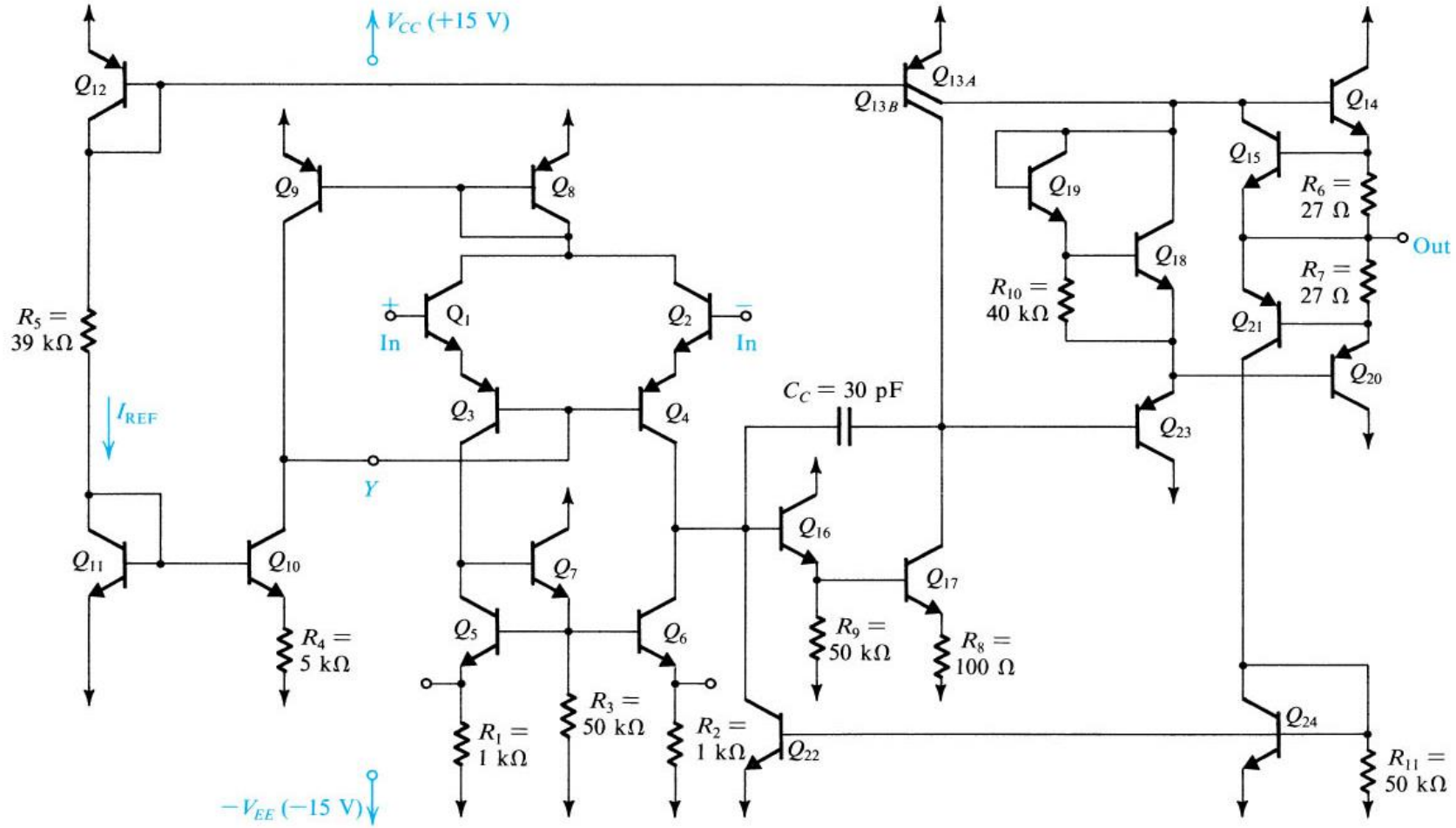
# 7. Ejemplos de amplificadores integrados

- ❑ **Q1 y Q2:**  
amplificador diferencial con salida diferencial.
- ❑ **Q3 y Q4:**  
amplificador diferencial con salida asimétrica.
- ❑ **Q5:**  
amplificador emisor común.
- ❑ **Q6:**  
seguidor de emisor.
- ❑ **Q7, Q8 y Q9:**  
espejo de corriente doble



# 7. Ejercicio: de nuevo con el 741

- ❑ La mayoría de los bloques básicos acaban de estudiarse
  - ¿qué bloques puede identificar y qué función realizan?

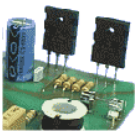




# Referencias

- ❑ Material de estudio:
  - Hambley, capítulo 7.
  - Malik, secciones: 6.7, 7.8.3, 7.8.5 y 7.9.(2-4)
  - Sedra-Smith, capítulo 6, secciones 6.1-5.
  
- ❑ Gráficas extraídas de los textos y secciones detallados.





# Control de revisiones

---

- 2017-02-27: versión inicial.